



**Hochschule Niederrhein**

University of Applied Sciences

**SWK E<sup>2</sup>**

**Institut für Energietechnik und  
Energiemanagement**

Institute of Energy Technology and  
Energy Management

# Entwicklung einer Quelle-Ziel-Zeit-Matrix auf Basis freier Datenquellen als Planungsgrundlage für eine Energieeffiziente Mobilität

## 17. Symposium Energieinnovation

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

Marius Madsen | Lukas Spengler | Marc Gennat

17.02.2022

# Agenda

## Einleitung & Datenquellen

Modellierung Stadtgebiet

Ansatz

Verkehrserzeugungsmodell

Verkehrszielwahlmodell

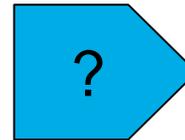
Ergebnis & Ausblick

# Einleitung

## Warum Verkehrsflussmodellierung?

### Potentiale für energieeffizientere Mobilität

- **Ganzheitliche Optimierung**
  - Lichtsignalanlagen
  - ÖPNV-Einsatz (Zeiten & Taktung)
- **Bedarfsgerechte Planung**
  - Straßen
  - Parkplätze
  - Fahrradwege
  - ÖPNV-Ausbau
  - Elektro-Ladeinfrastruktur
- **Simulation / Potentialanalyse**
  - On-Demand-Verkehr
  - Autonome Fahrzeuge



**Wann** wollen  
**wie viele** Menschen  
**von wo**  
**nach wo**  
zu welchem **Zweck**?

# Einleitung

## 4 Stufen einer Verkehrsflussmodellierung



### Methoden

Oft Parameterschätzverfahren auf Basis von:

- Mobilfunkzellenauswertungen
- Verkehrsstärkemessungen
- Floating Car Data
- Tracking mit Apps
- Detaillierte Mobilitätsbefragungen

### Nachteile:

- Kostenaufwändig
- Nutzung personenbezogener Daten
- Isolierte Betrachtung von Individualverkehr



Entwicklung einer Methode auf Basis freier Datenquellen

# Datenquellen

## Offene Datenquellen für die Stadt Krefeld

Datenquelle	Inhalt
Liegenschaftskataster	<ul style="list-style-type: none"><li>• Gebäudefunktion aller Gebäude</li><li>• Gebäude- Standort / Flächen / Etagenanzahl</li></ul>
Mobilitätsbefragung	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tageszeitliche Verkehrszweckverteilung</li><li>• Stadtteil-zu-Stadtteil-Verkehrsstärke</li><li>• Tageszeitliche Beschäftigung</li></ul>
Bezirksatlas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Statistische Informationen zu Einwohnern in Bezirken / Stadtteilen</li></ul>

# Agenda

Einleitung & Datenquellen

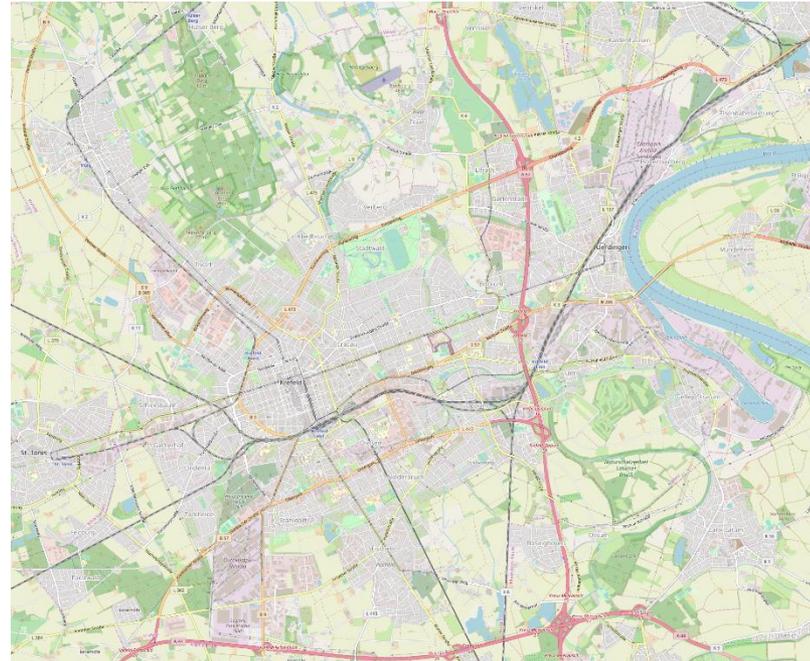
**Modellierung Stadtgebiet**

Ansatz

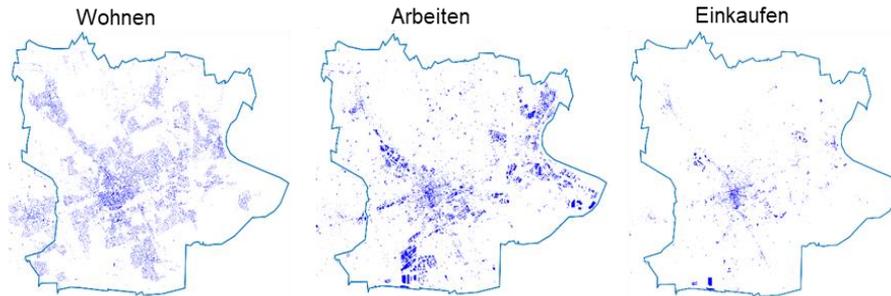
Verkehrserzeugungsmodell

Verkehrszielwahlmodell

Ergebnis & Ausblick



# Modellierung Stadtgebiet Krefeld

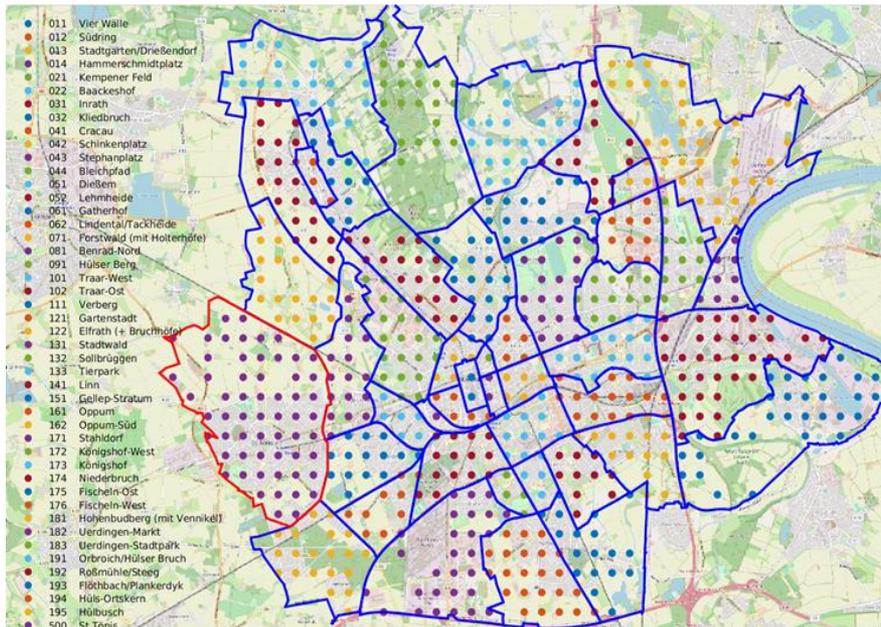


## Aufteilung Gebäudefunktionen:

- In 10 vereinfachte Gebäudefunktionen  
Wohnen | Arbeiten | Einkaufen (tägl. Bed.) | Einkaufen (sonst. Bed.) | Besorgungen | Ausbildung | Freizeit
- Anteilige Zuordnung hybrider Gebäudefunktionen

## Diskretisierung in 794 Verkehrszellen:

- 400 Meter x 400 Meter
- 630.436 mögliche Wegverbindungen
- Zuordnung von jedem Gebäude  
→ Jede Gebäudefläche (je Gebäudefunktion) einer Zelle zugeordnet



# Agenda

Einleitung & Datenquellen

Modellierung Stadtgebiet

## **Ansatz**

Verkehrserzeugungsmodell

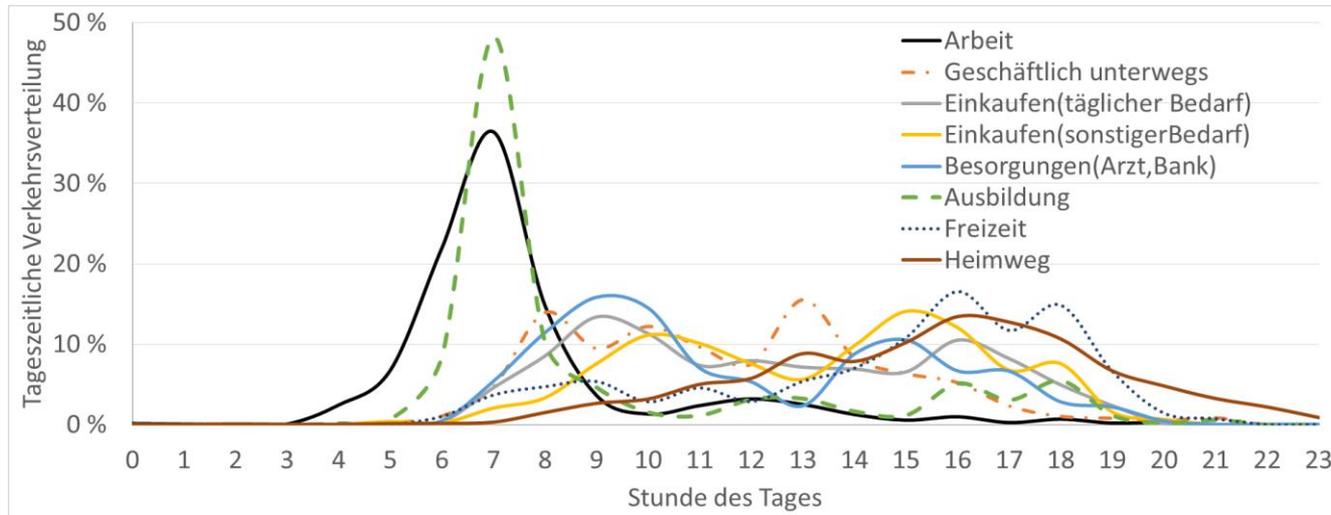
Verkehrszielwahlmodell

Ergebnis & Ausblick

# Ansatz

## Verknüpfung offener Datenquellen

### Mobilitätsbefragung (Reisezwecke)



Bildquelle:  
Mobilitätsbefragung zum  
werktaglichen  
Verkehrsverhalten der  
Bevölkerung in der Stadt  
Krefeld. Ingenieurbüro  
Helmert, Aachen 2017.

Arbeiten

Einkaufen (tägl.  
Bed.)

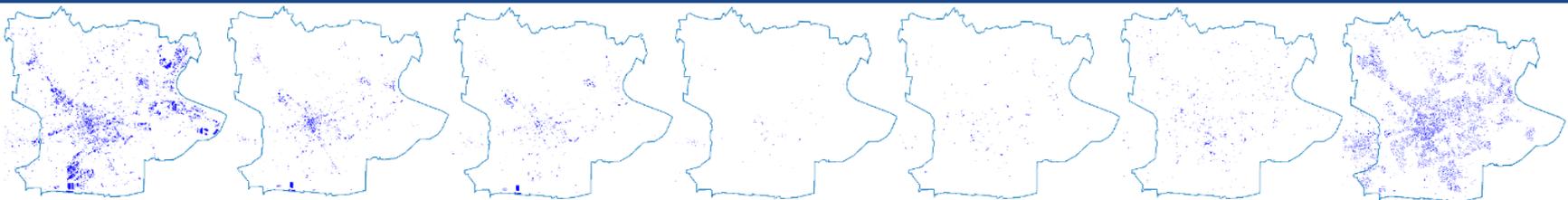
Einkaufen  
(sonst. Bed.)

Besorgungen

Bildung

Freizeit

Wohnen



### Liegenschaftskataster (Nutzungsarten)

# Agenda

Einleitung & Datenquellen

Modellierung Stadtgebiet

Ansatz

**Verkehrserzeugungsmodell**

Verkehrszielwahlmodell

Ergebnis & Ausblick



# Verkehrserzeugungsmodell

## Verkehrserzeugung

nach von	Hüls	Hülser Berg	Traar	Verberg	Gartenstadt	Uerdingen
Hüls	23.600	590	410	170	430	840
Hülser Berg	590	0	170	210	0	260
Traar	600	170	2.860	390	270	890
Verberg	170	210	310	240	130	480
Gartenstadt	540	0	460	70	2.170	2.950
Uerdingen	570	100	1.230	480	3.160	22.970
Bockum	1.240	150	620	390	950	5.800
Inrath/Kliedbruch	2.340	100	780	1.090	480	1.890
Kempener Feld/Baackeshof	1.570	160	290	150	390	680
Benrad-Nord	0	90	0	0	110	160
Benrad-Süd	640	160	0	0	0	190
Dießem/Lehmheide	670	90	120	60	230	1.340
Stadtmitte	2.180	90	460	900	660	2.340
Cracau	880	20	1.050	500	610	2.990
Oppum	60	0	360	100	230	1.550
Linn	80	0	210	0	860	3.690
Gellep-Stratum	0	0	0	0	0	940
Fischeln	220	80	350	390	420	1.220

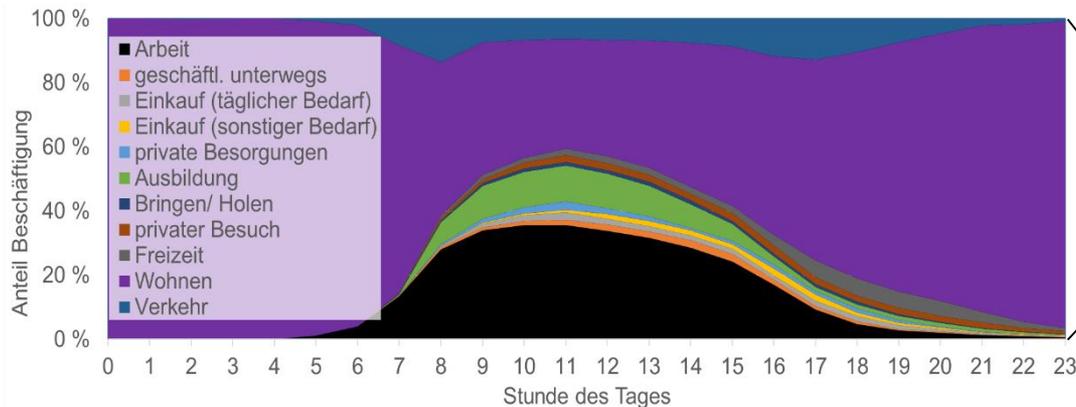
### Verflechtungsmatrix:

- Anzahl Wege die aus einem Stadtteil herausführen bekannt
- Zuteilung auf einzelne Verkehrszellen?
- Tageszeitliche Verteilung?

# Verkehrserzeugungsmodell

## Zuteilung der Verkehrserzeugung auf einzelne Zellen

### Tageszeitliche Beschäftigung



#### Verkehrsquelle:

- Gewichtung je Uhrzeit
- Ausnahme:
- geschäftlich unterwegs

### Abschätzung der tageszeitlichen Verteilung von Stadtteil-Verkehrserzeugung

- **Gewichtung der Startpunkte von Wegen anhand**
  - Wege die an Wohngebäuden beginnen: **Bevölkerungsdichte**
  - Übrige: **Gebäudeflächen** je Gebäudefunktion

### Abschätzung der tageszeitlichen Verteilung von Zellen-Verkehrserzeugung

- **Verteilung auf Zellen** innerhalb der Stadtteile anhand
  - **Gebäudeflächen** je Gebäudefunktion

# Agenda

Einleitung & Datenquellen

Modellierung Stadtgebiet

Ansatz

Verkehrserzeugungsmodell

**Verkehrswahlmodell**

Ergebnis & Ausblick



# Verkehrszielwahlmodell

## Erste Näherung durch Vorwärtsrechnung

**Annahme: Jeder Quadratmeter einer Gebäudefunktion erzeugt gleich viele Wege**

→ Wegezielverteilung  $b_{k,d}$  für jeden Reisezweck  $k$  und jeden Stadtteil  $d$ :

$$b_{k,d} = \frac{a_{k,d}}{a_{\Sigma,k}} \tilde{b}_k \cdot w_{\Sigma} \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \cap d \in \{1, \dots, D\}$$

Dabei ist  $a_{k,d}$  dem Reisezweck  $k$  zugeteilte Fläche  $a$  innerhalb eines Stadtteils  $d$

**Ergebnis: Vereinfachte Quelle-Ziel-Reisezweck-Matrix (Stadtteil-zu-Stadtteil)**

**Problem: Annahme belastbar?**

Beispiel: Lagerhalle vs. Bürogebäude → gleich viele Arbeitswege pro m<sup>2</sup> ?

# Verkehrszielwahlmodell

## Nebenbedingungen

Anzahl der Wege immer positiv

$$x_{k,d} \geq 0$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \cap d \in \{1, 2, \dots, D\}$$

Summe der Wege über alle Reisezwecke in einen Stadtteil  $d$  müssen der Anzahl aller Wege  $w_d$  der Mobilitätsbefragung entsprechen

$$\sum_{k=1}^K a_{k,d} \cdot x_{k,d} = w_d$$

$$\forall d \in \{1, \dots, D\}$$

nach \ von		nach						
		Hüls	Hülser Berg	Traar	Verberg	Gartenstadt	Uerdingen	Bockum
Hüls	23.600	590	410	170	430	840	1.190	
Hülser Berg	590	0	170	210	0	260	150	
Traar	600	170	2.860	390	270	890	870	
Verberg	170	210	310	240	130	480	390	
Gartenstadt	540	0	460	70	2.170	2.950	850	
Uerdingen	570	100	1.230	480	3.160	22.970	5.500	
Bockum	1.240	150	620	390	950	5.800	22.140	
Inrath/Kliedbruch	2.340	100	780	1.090	480	1.890	5.020	
Kempener Feld/Baackeshof	1.570	160	290	150	390	680	1.760	

Einhaltung der zeitlich gemittelten Reisezweckverteilung  $\tilde{b}_k$  für die Gesamtstadt

$$\sum_{d=1}^D a_{k,d} \cdot x_{k,d} = \tilde{b}_k \cdot w_\Sigma$$

$$\forall k \in \{1, \dots, K\}$$

k	Reisezweck	Anteil
1	Arbeitsweg	18,3%
2	Einkaufen (tägliches Bedarf)	6,9%
3	Einkaufen (sonstiger Bedarf)	4,9%
4	Besorgungen (Arzt, Bank, etc.)	5,1%
5	Ausbildung	5,8%
6	Freizeit	8,3%
7	Heimwege und priv. Besuche	50,8%

# Verkehrszielwahlmodell

## Verkehrszielwahl unter Nebenbedingungen

Ansatz: Parameterschätzverfahren (Methode der kleinsten Quadrate)

**Formulierung der Zielfunktion:**

$$J^* = \min_{\mathbf{X}} c(\mathbf{X}) \quad \text{mit} \quad \mathbf{X}^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{X}} c(\mathbf{X})$$

**Kostenfunktion**

$$c(\mathbf{X}) = \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D (a_{k,d} \cdot x_{k,d} - b_{k,d})^2$$

**Ergebnis: Verkehrszielwahlmodell für Stadtteil-zu-Stadtteil-Verkehr**

# Verkehrszielwahlmodell

## Datennachbearbeitung

### Verteilung der Wege auf einzelne Verkehrszellen

- Stadtteil-zu-Stadtteil → Zelle-zu-Zelle
- Zuteilung der Wege je Reisezweck  $k$  mit den Gebäudeflächen  $\tilde{a}_{i,k}$  auf Zellen  $i$

$$\tilde{x}_{i,k} = \tilde{a}_{i,k} \cdot x_{k,d} \quad \forall i \in \{1, \dots, 794\} \cap k \in \{1, \dots, K\} \cap d \in \{1, \dots, D\}$$

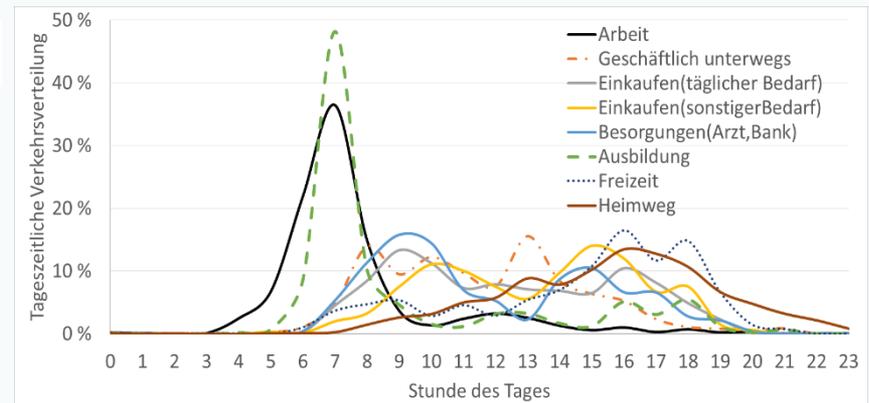
### Zeitliche Verteilung der Wege

- Einfache Aufteilung aller Wege auf einzelne Stunden  $h$  je nach Reisezweck  $k$

$$\hat{x}_{i,k,h} = d_{h,k} \cdot \tilde{x}_{i,k} \quad \forall h = \{1, \dots, 24\}$$

$\tilde{x}_{i,k}$ : ankommende Wege in Zelle  $i$  mit Reisezweck  $k$

$d_{h,k}$ : tageszeitliche Verteilung des Reisezwecks  $k$



# Agenda

Einleitung & Datenquellen

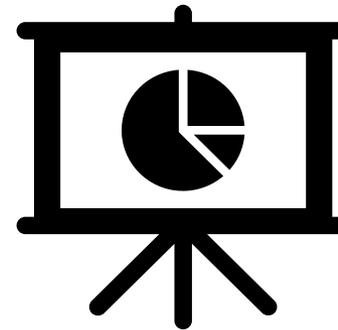
Modellierung Stadtgebiet

Ansatz

Verkehrserzeugungsmodell

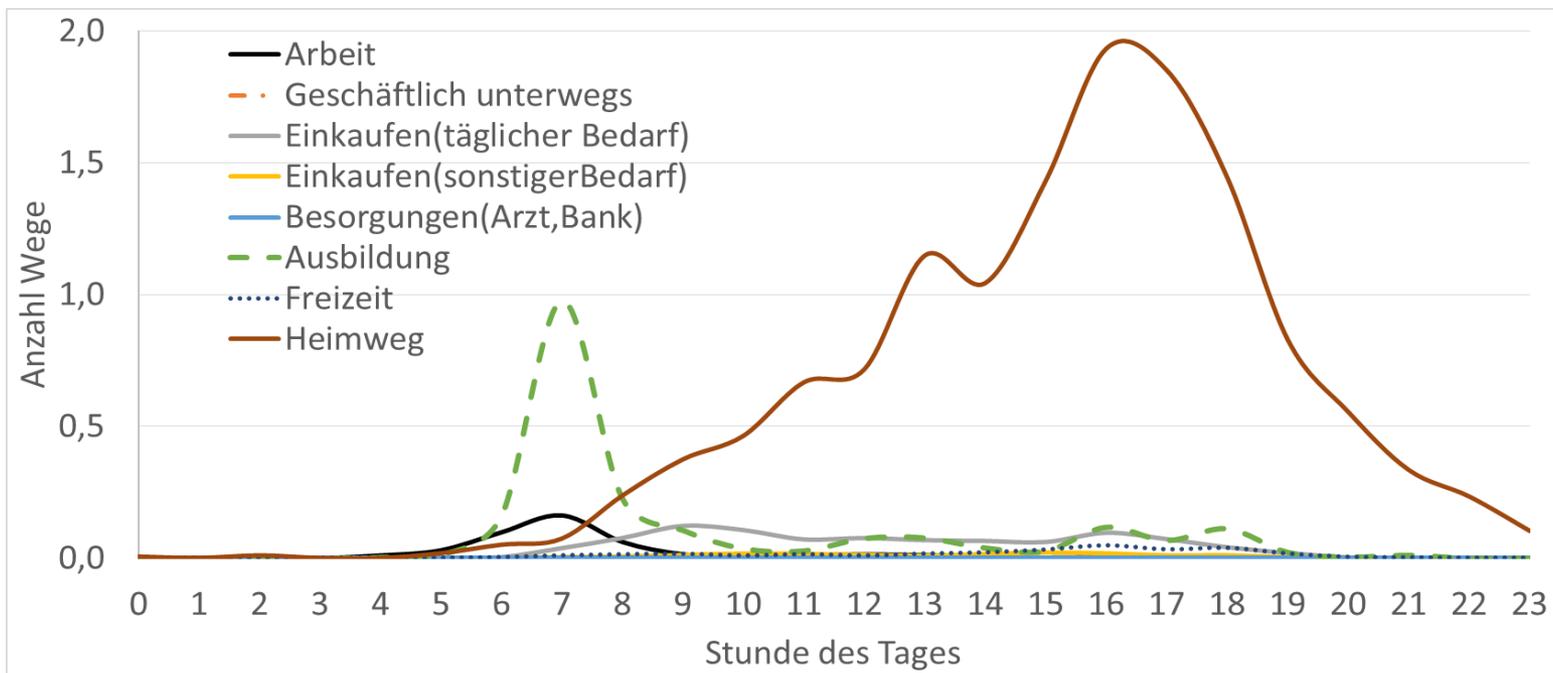
Verkehrszielwahlmodell

**Ergebnis & Ausblick**



# Ergebnis

- Verkehrserzeugungsmodell ↔ Verkehrszielwahlmodell  
→ Quelle-Ziel-Zeit-Reisezweck-Matrix für 630.436 Relationen
- Methode ist übertragbar auf Städte mit veröffentlichtem Liegenschaftskataster
- Ergebnis für Beispielrelation [Zelle 1 (Innenstadt) zur Zelle 600 (Wohngebiet)]:



# Ausblick

## Methode:

- Bewertung / Ermittlung des Modellfehlers (z.B. durch ungenutzte Gebäude)
- Abschätzung der Modalsplits für jede Relation
  - Verkehrsmittelabhängige Reisewiderstände
  - Empirische Daten
- Abschätzung von Wegen die nicht rein innenstädtisch sind
  - Zur Ermittlung von Querschnittsbelastungen
- Gewichtung von Gebäudefunktionen (Bsp: Lagerhalle vs. Bürogebäude)

## Anwendungen:

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



# Literatur 1

- [1] M. Alesić, „Dynamische Umlegung von Quelle-Ziel-Matrizen mit einem makroskopischen Verkehrsflussmodell“. Stuttgart: Springer Vieweg, 2012.
- [2] C. Helmert und H. Henninger, „Mobilitätsbefragung zum werktäglichen Verkehrsverhalten der Bevölkerung in der Stadt Krefeld“. Aachen: Ingenieurbüro Helmert, 2017.
- [3] Statistisches Bundesamt, „Straßenverkehr: EU-weite CO2-Emissionen seit 1990 um 24 % gestiegen“. Destatis, [https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/CO2\\_Strassenverkehr.html](https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/CO2_Strassenverkehr.html) (Aufgerufen 30.November, 2021).
- [4] Stadt Krefeld, „Bezirksatlas 2018“. Krefeld: Stadt Krefeld - Abteilung Statistik und Wahlen, 2019.
- [5] Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, „Liegenschaftskataster Stadt Krefeld“. Stadt Krefeld, <https://open.nrw/dataset/liegenschaftskataster-stadt-krefeld-odp> (Aufgerufen 12.Februar, 2021).
- [6] Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, „Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS®)“. AdV, <https://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Liegenschaftskataster/ALKIS/> (Aufgerufen 30.November, 2021).
- [7] S. Mohanty, A. Pozdnukhov, „Dynamic Origin-Destination Demand Estimation From Link Counts, Cellular Data And Travel Time Data“. Mumbai: World Conference on Transport Research, 2019.
- [8] J. Dallmeyer, „Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt“. Frankfurt am Main: Springer Vieweg 2013.
- [9] W. Schnabel, D. Lohse, „Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung“. Berlin: Beuth 2011.
- [10] M. Madsen, L. Spengler, M. Gennat, „Entwicklung einer Kennzahl zur Identifikation von Verbesserungspotential in der Verkehrsinfrastruktur“ in „Transforming Mobility – What Next?“. Duisburg: Springer 2021.
- [11] M. Gennat, M. Madsen, L. Spengler, „Computation of Travel Purpose Distribution Using Open Data Sources“. Bern: Operations Research 2021.

# Literatur 2

- [12] M. Madsen, L. Spengler, M. Gennat, „Entwicklung einer Quelle-Ziel-Zeit-Matrix auf Basis freier Datenquellen als Planungsgrundlage für eine energieeffizientere Mobilität“. Graz: 17. Symposium Energieinnovation 2022. -Im Veröffentlichungsprozess-
- [13] G. Steierwald, H.-D. Künne, „Stadtverkehrsplanung“. Stuttgart: Springer, 2005.
- [14] Open Street Map-Mitwirkende. Deutschland. Open Data Commons Open Database Lizenz ODbL ([www.openstreetmap.org/copyright](http://www.openstreetmap.org/copyright)), 2021.
- [15] Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft, „Mobilität in Deutschland 2017 - Ergebnisbericht“. Bonn: BMDV 2018.
- [16] Google, „General Transit Feed Specification (GTFS) - Overview“. Google: <https://developers.google.com/transit/gtfs> (Aufgerufen 21. Januar, 2022).
- [17] Intraplan Consult GmbH, „Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im Schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr“. München: ITP 2016.
- [18] Bezirksregierung Köln, „Digitales Geländemodell NW Gitterweite 1m“. Geobasis NRW: <https://open.nrw/dataset/0c6796e5-9eca-4ae6-8b32-1fcc5ae5c481> (Aufgerufen 18. Januar, 2022).
- [19] D. Huber, T. Viere, E. H. Nemoto, I. Jaroudi, D. Korbee, G. Fournier, „Climate and environmental impacts of automated minibuses in future public transportation“. Brüssel: „Transportation Research Part D Transport and Environment“ 2022.
- [20] D. Briskorn, „Operations Research“. Wuppertal: Springer Gabler, 2019.
- [21] J.V. BECK, K.J. ARNOLD, „Parameter Estimation in Engineering and Science“ in „AIChE Journal (Vol. 24, No. 2)“ 1978.

# Impressum

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

Hochschule Niederrhein

Reinarzstr. 49

47805 Krefeld

Marius Madsen, M.Eng.	Prof. Dr.-Ing. Marc Gennat
<a href="mailto:marius.madsen@hs-niederrhein.de">marius.madsen@hs-niederrhein.de</a>	<a href="mailto:marc.gennat@hs-niederrhein.de">marc.gennat@hs-niederrhein.de</a>
Tel: +49 (0)2151 822-6697	Tel: +49 (0)2151 822-5112



**Hochschule Niederrhein**

University of Applied Sciences

**SWK E<sup>2</sup>**

**Institut für Energietechnik und  
Energiemanagement**

Institute of Energy Technology and  
Energy Management