

## EnInnov 2024

# Makroskopisches Mobilitätsmodell zur Identifizierung von Energieeffizienzpotenzialen im ÖPNV

Lukas Spengler, M.Sc.

SWK E<sup>2</sup> Institut - Hochschule Niederrhein

Forschungsprojekt BestMOD

# Agenda

Motivation & Stand der Technik



Daten und Mobilitätsmodell



Auswertungsmethodik



Ergebnisse



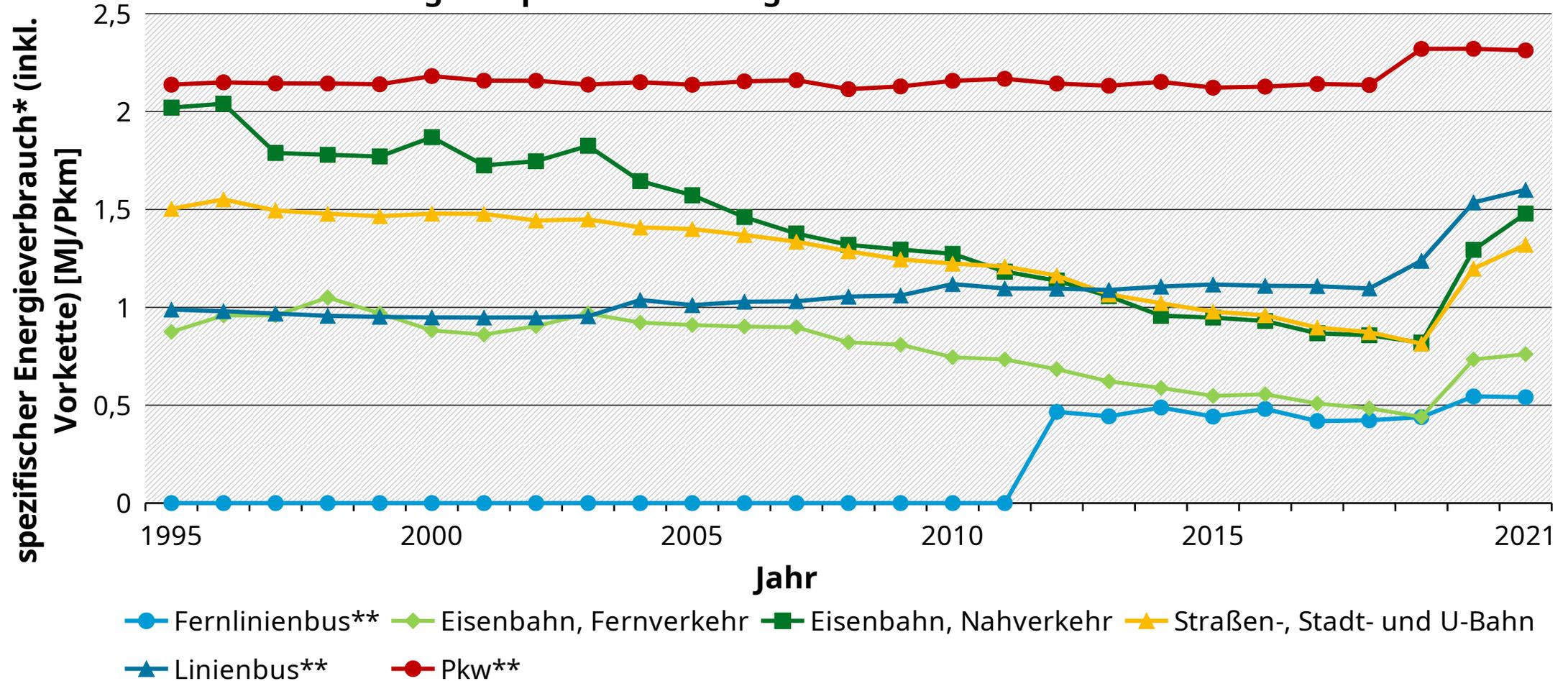
Ausblick



Bildquelle: Pexels

# Motivation

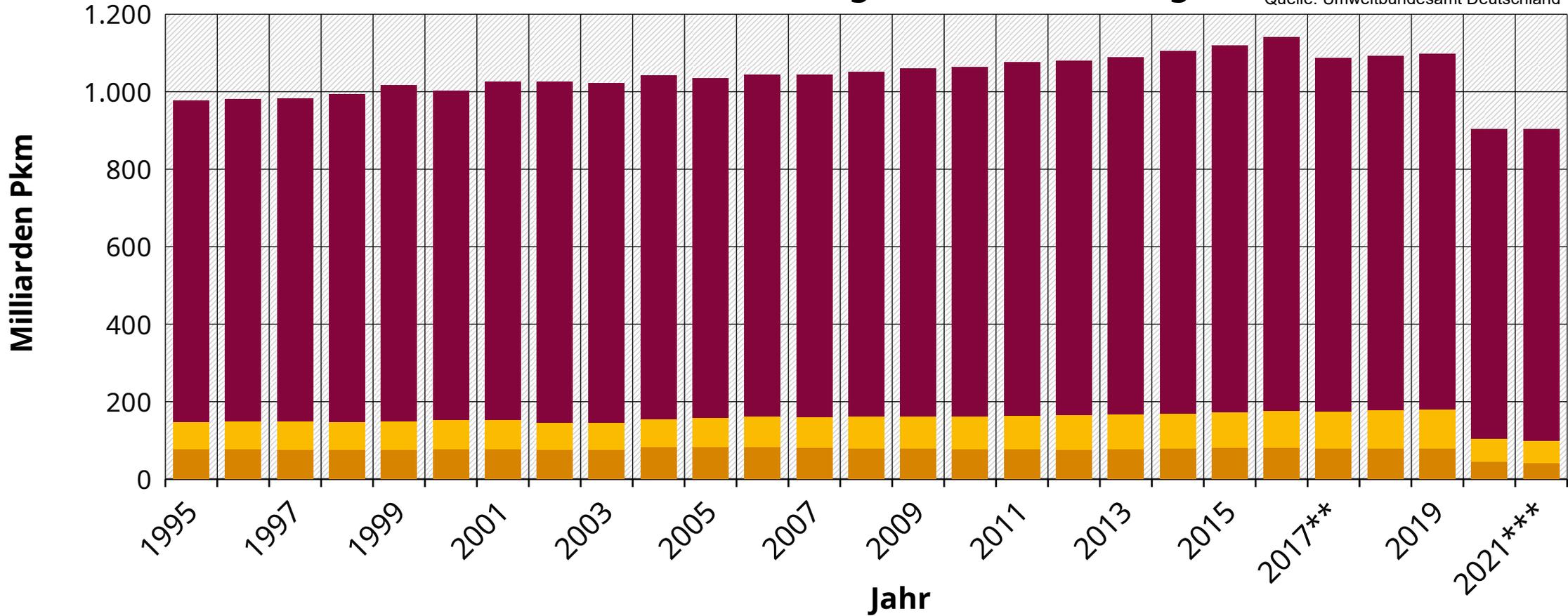
Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs im Personenverkehr Quelle: Umweltbundesamt Deutschland



\* inkl. Emissionen aus Bereitstellung & Umwandlung der Energieträger in Strom, Benzin, Diesel, Flüssig- & Erdgas  
 \*\* ab 2019 Methodenwechsel in der Vorkettenmodellierung, Werte ab 2019 daher nur eingeschränkt mit den Vorjahren vergleichbar

## Motorisierte Verkehrsleistung nach Verkehrsträger

Quelle: Umweltbundesamt Deutschland



\*\* ab 2017 Neuberechnung der Fahrleistungs- und Verbrauchsberechnung und des Personenverkehrsmodells, hier Verkehr mit Pkw, mot. Zweirädern etc. Einschl. Taxi- und Mietwagenverkehr.  
 \*\*\* zum Teil vorläufige Werte, die ausgewiesenen Daten für den Liniennahverkehr (insbesondere mit Bussen) bilden möglicherweise die tatsächlichen Rückgänge nicht vollständig ab

# Forschungsfrage



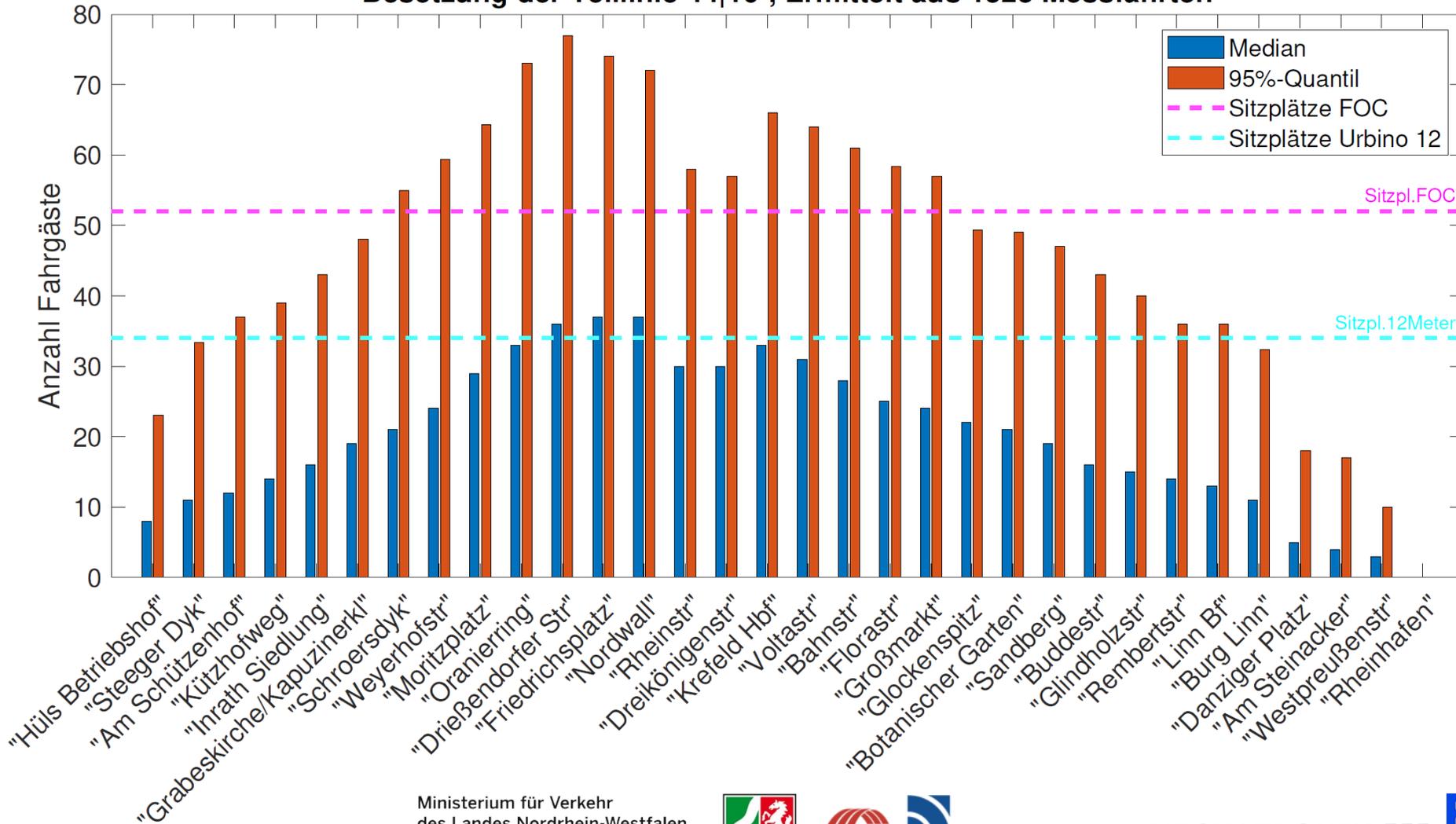
Wie können Über- und Unterangebote im ÖPNV identifiziert werden?

Bildquellen: Bing Copilot mit DALL-E 3

# Stand der Technik

## Besetzungsgrade messen

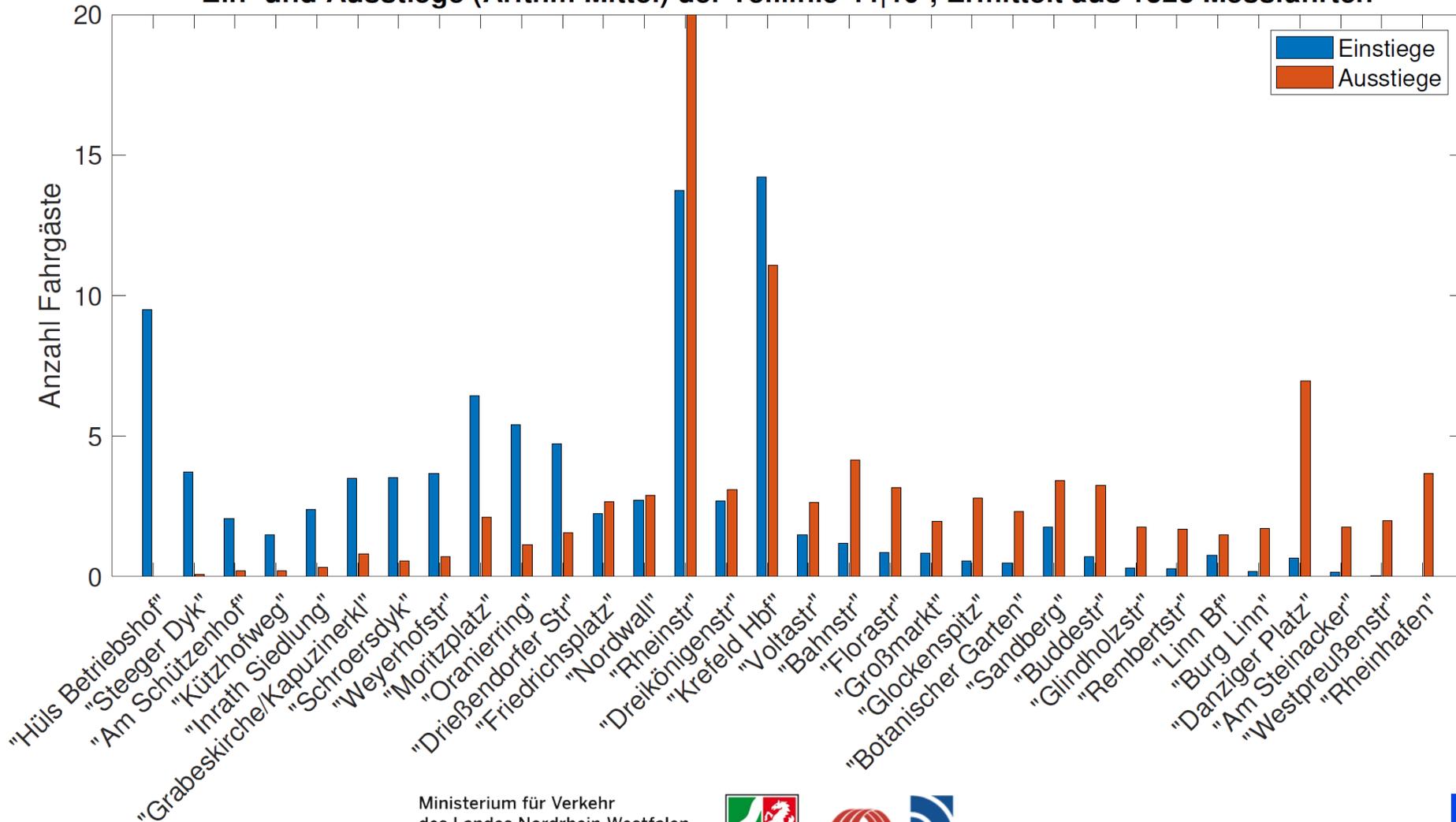
Besetzung der Teillinie 44|10 ; Ermittelt aus 1323 Messfahrten



# Stand der Technik

## Besetzungsgrade messen

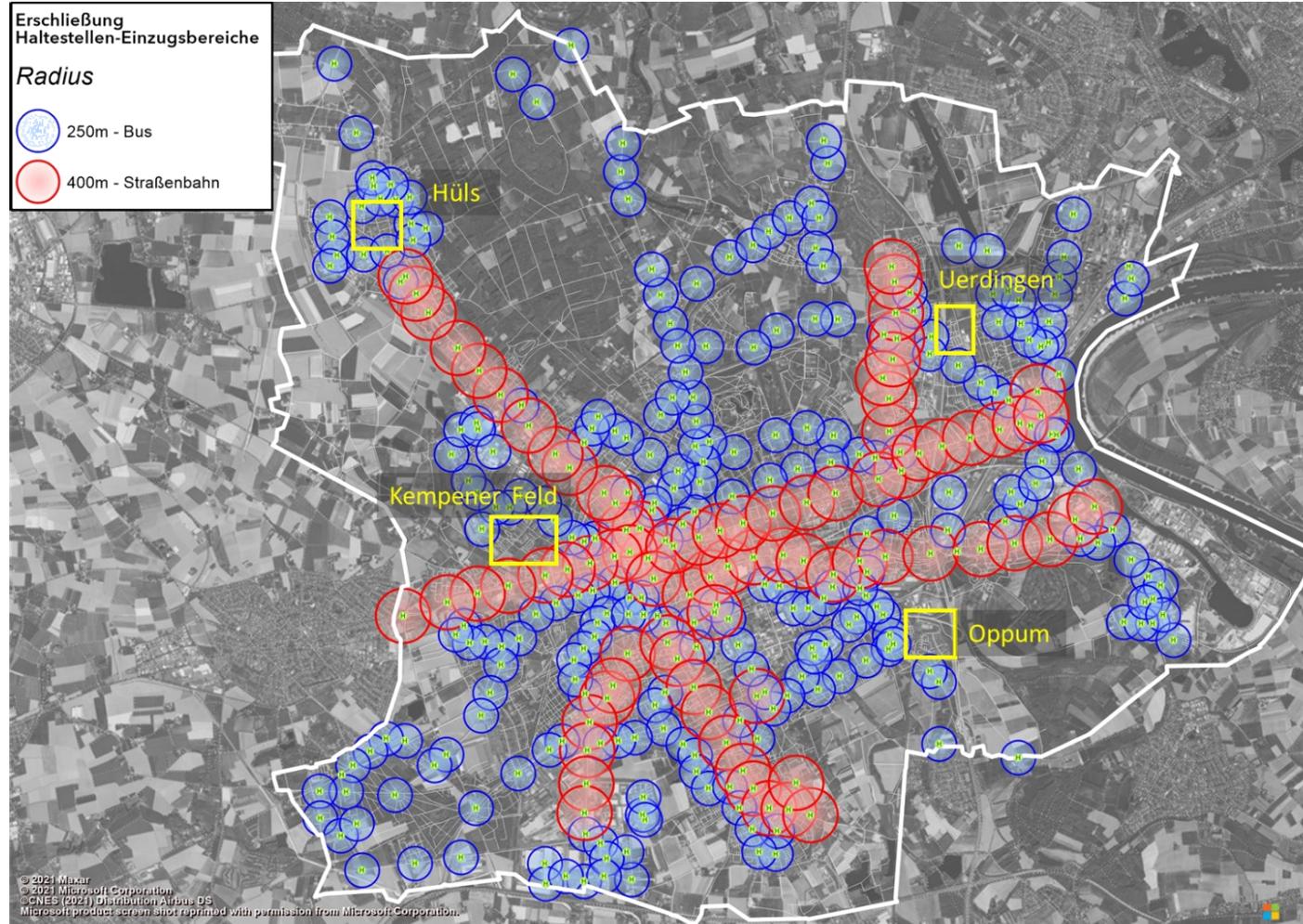
Ein- und Ausstiege (Arithm Mittel) der Teillinie 44|10 ; Ermittelt aus 1323 Messfahrten



# Stand der Technik

## Entfernung zur Haltestelle

Nahverkehrsplan Fortschreibung 2022 Krefeld



Quelle: Darstellung PTV

Ministerium für Verkehr  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Hochschule Niederrhein  
University of Applied Sciences  
SWK E²

**MECHATRONIK**  
Universität Duisburg-Essen | www.imech.de

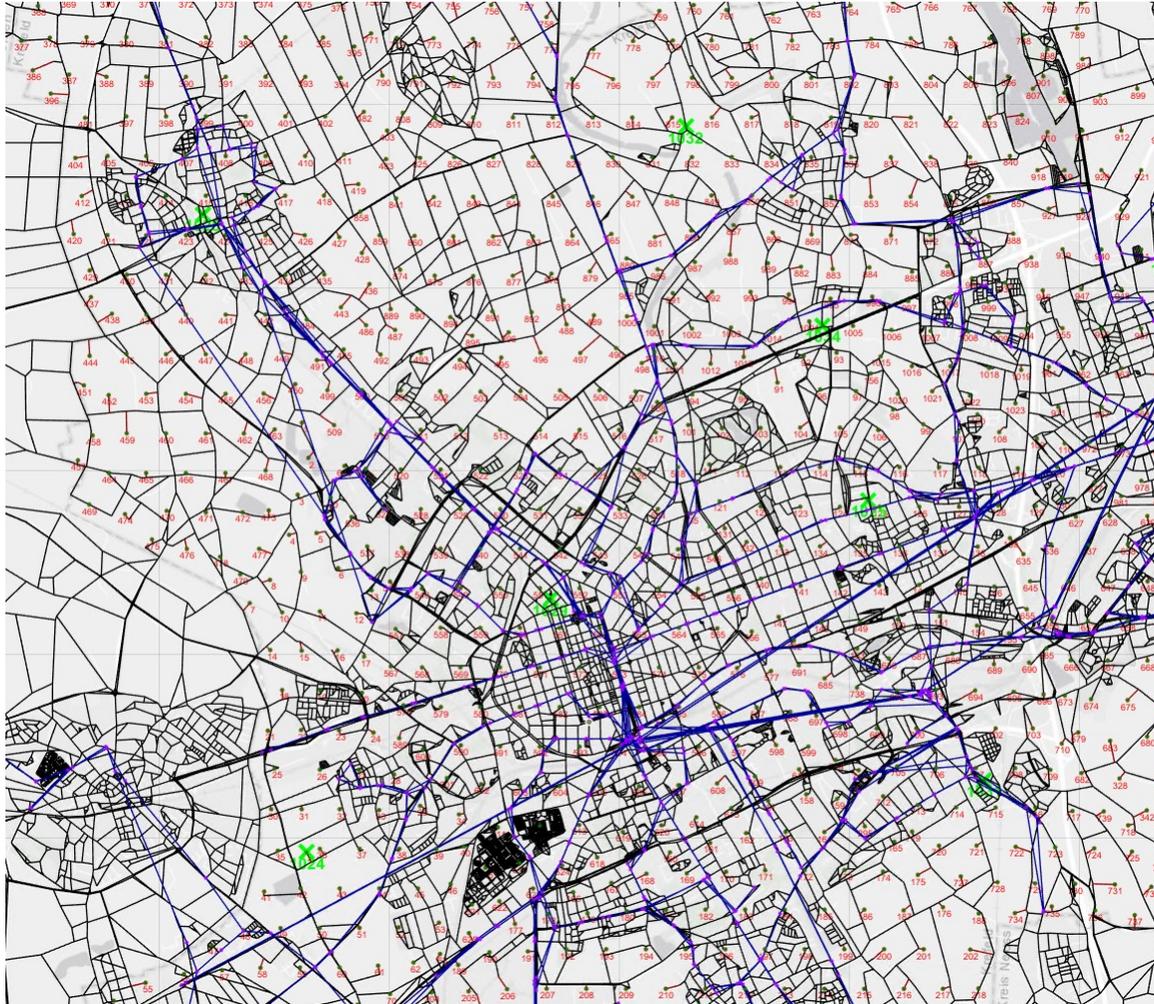
UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

Offen im Denken



# Methodik

## Bewertungsansatz



Ministerium für Verkehr  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Hochschule Niederrhein  
University of Applied Sciences  
SWK E²

MECHATRONIK  
Universität Duisburg-Essen | www.imech.de



Offen im Denken

Mobilitätsbedarf  
[Pers./h]

0 1,5 3 4,5 6 > 7,5

Spezifischer Widerstand  
[min/km]

		0	1	2	3	4	5
0	0	-12	-9	-6	-3	-1	0
3	1	-9	-5	-2	-1	0	1
6	2	-6	-2	0	0	1	3
9	3	-3	-1	0	0	2	6
12	4	-1	0	1	2	5	9
> 15	5	0	1	3	6	9	12

potenzielles **Überangebot**  
→ Besetzungsgrade prüfen

potenzielles **Ausweitungspotenzial**

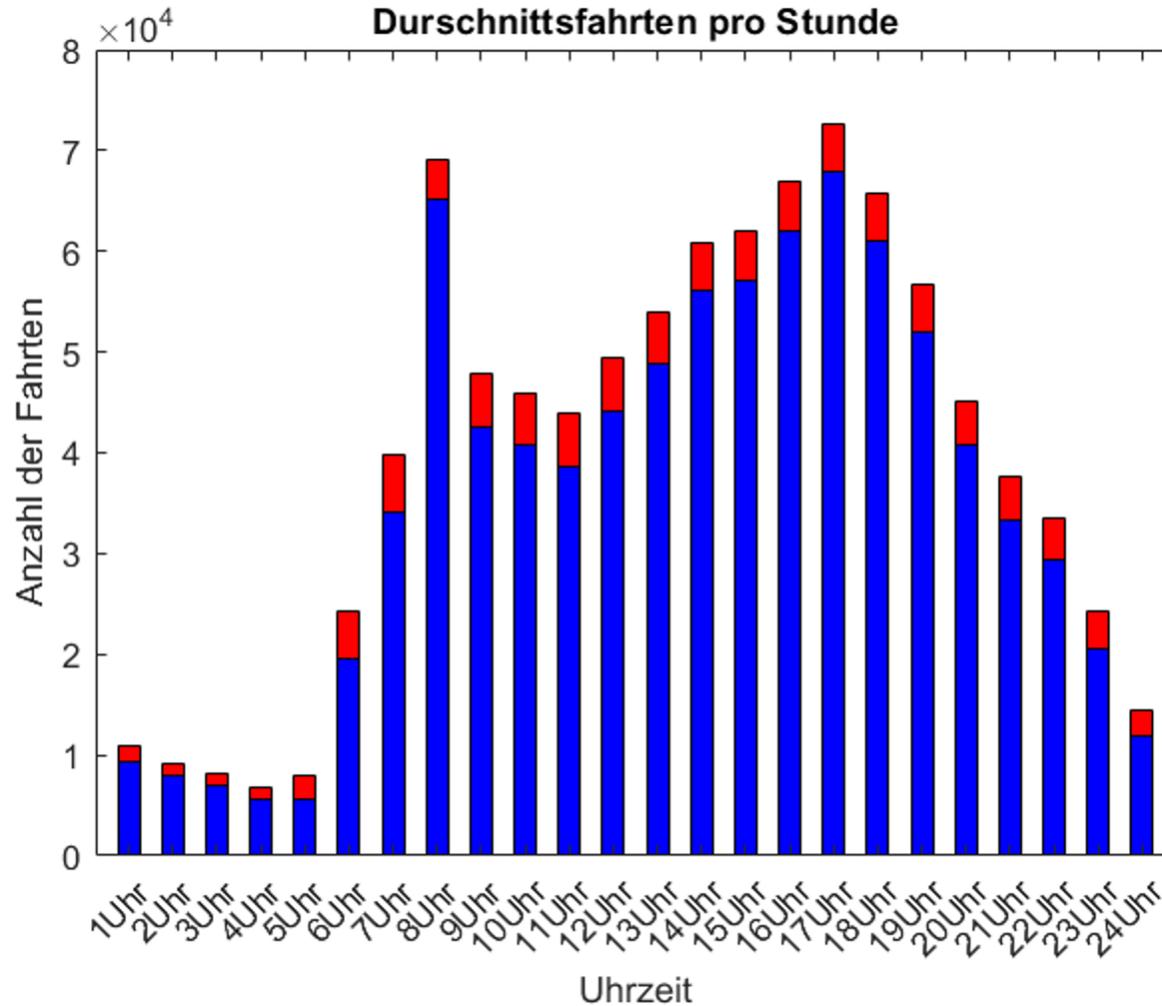
# Datenbasis

## Mobilfunkdaten

- **12 Monate** Quelle-Ziel-Bewegungsdaten deutschlandweiter Telefonica-Kunden (Juni 2022 - Mai 2023)
  - ca. **28% Marktanteil**
- Hochrechnung je PLZ auf Gesamtbevölkerung
- **Annahmen:**
  - Personen mit Telefonica-Netz haben **gleiches Mobilitätsverhalten** wie Personen mit anderen Netzanbietern und Personen ohne Handy innerhalb der selben PLZ
  - Handy ist **immer dabei**
  - Eine Fahrt endet, wenn sich **> 30 Minuten am Zielort aufgehalten** wird
    - Fehlerhaftes **Trennen** von Reisen
      - z. B. Anschlussverbindung ausgefallen
    - Fehlerhaftes **Zusammenfügen** von Reisen
      - z. B. Hol- und Bring-Fahrten, Aufenthalt beim Bäcker
- keine Unterscheidung der Verkehrsmittel

# Datenbasis

## Mobilfunkdaten - Anonymisierungsfehler



- Runden auf die nächste 5
- Bei  $\leq 4$  Reisen je Start-Ziel-Zeit-Relation wird auf 0 abgerundet

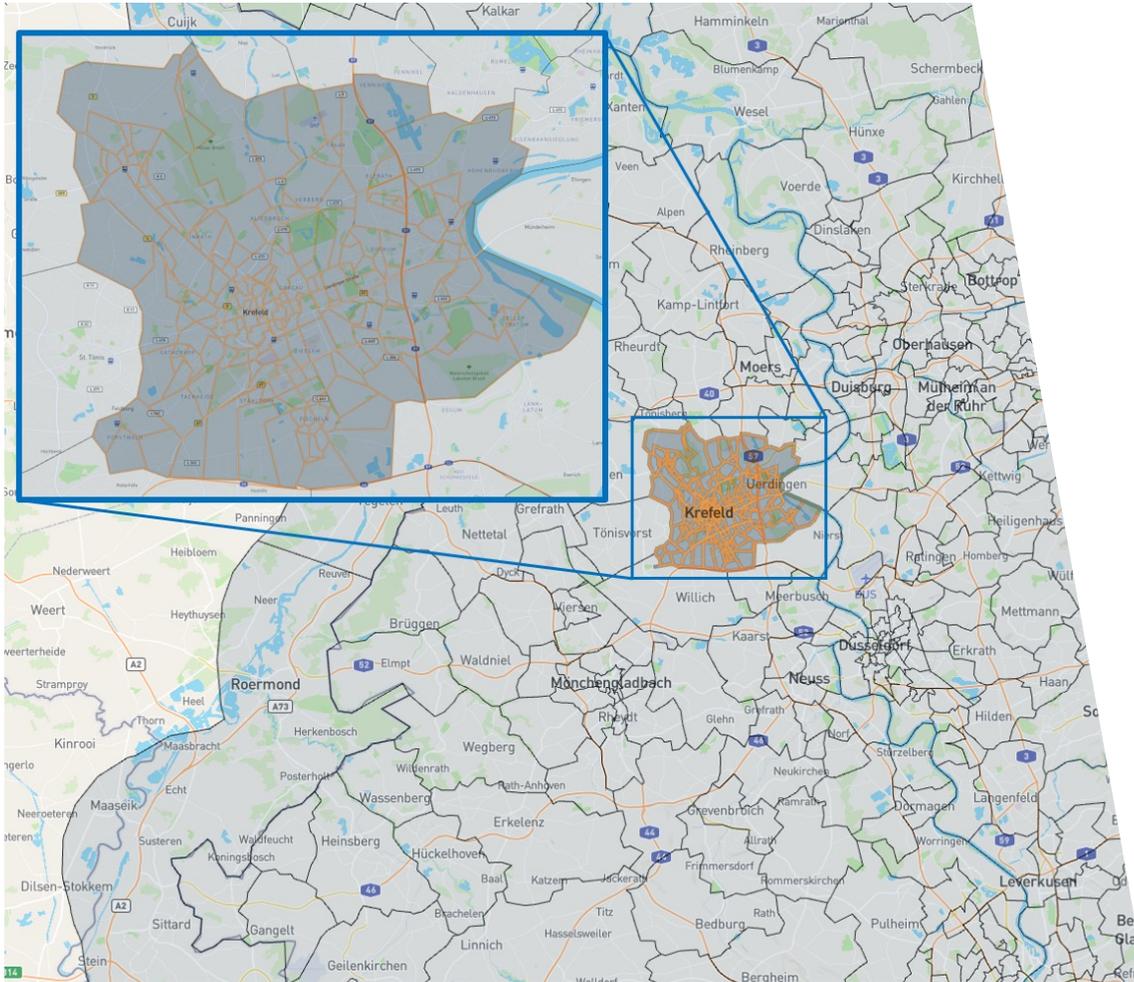
Zwei Betrachtungsebenen:

- Krefeld als 215 Basiszonen
- Krefeld als 1 Gemeinde

→ Differenz zu Ebene mit Basiszonen addieren

# Datenbasis

## Mobilfunkdaten - Räumliche Auflösung



- **Bundesländer** jeweils 1 Verkehrszelle
- NRW in **Landkreise** aufgeteilt
- Landkreise mit > 20.000 Reisen/Monat von und nach Krefeld in **Gemeinden** unterteilt
- Gemeinden mit > 20.000 Reisen/Monat von und nach Krefeld in **Postleitzahl** unterteilt
- Krefeld in 215 **Basiszonen** unterteilt

Quelle: Teralytics Matrix

Ministerium für Verkehr  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Hochschule Niederrhein  
University of Applied Sciences  
SWK E²

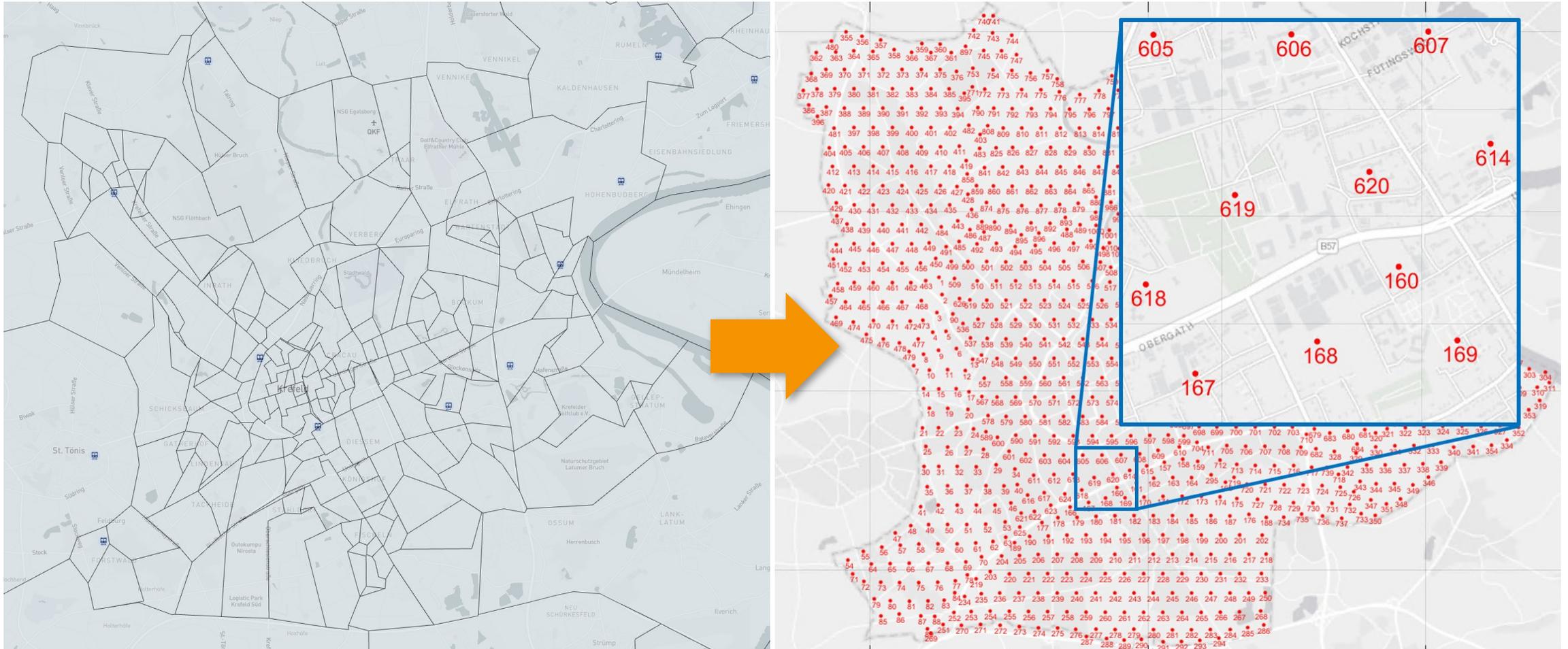
**MECHATRONIK**  
Universität Duisburg-Essen | www.imech.de

UNIVERSITÄT  
**DUISBURG  
ESSEN**

Offen im Denken

# Datenbasis

## Übertragung Teralytics Verkehrszellen in Mobilitätsmodell



Quelle: Teralytics Matrix

Ministerium für Verkehr  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Hochschule Niederrhein  
University of Applied Sciences  
SWK E²

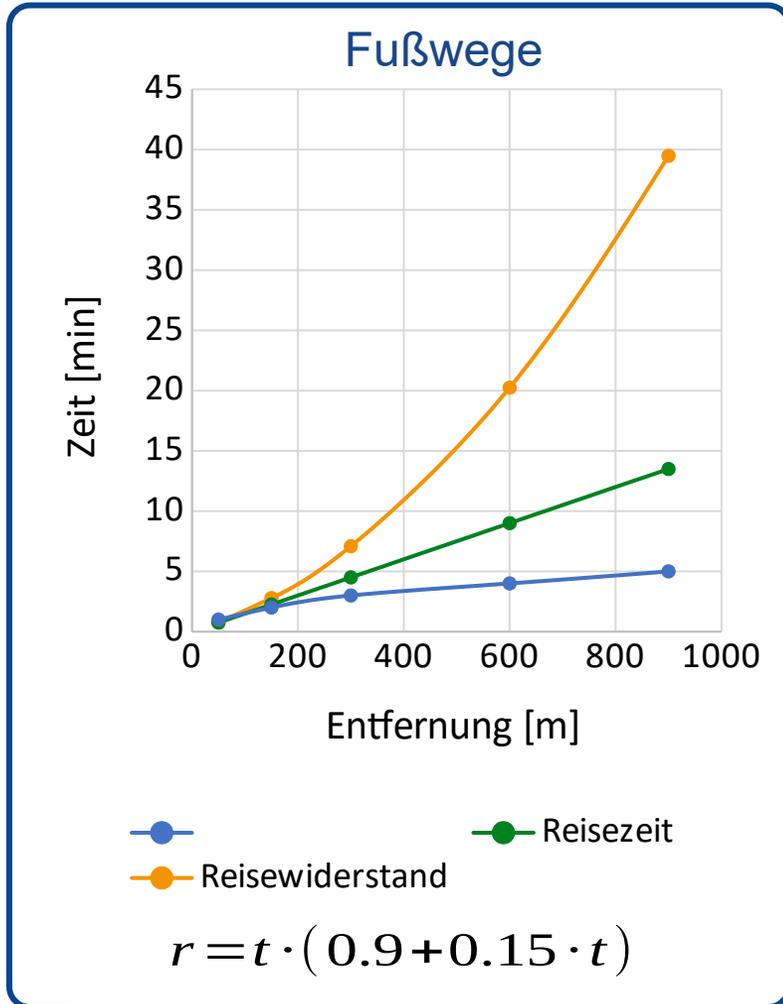
MECHATRONIK  
Universität Duisburg-Essen | www.imech.de

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

Offen im Denken

# Reisewiderstände

## ÖPNV - Unannehmlichkeiten als Reisezeitäquivalente



Reisezeit  $t$   
Reisewiderstand  $r$

Wartezeiten  
 $r = t \cdot 1.3$

### Infrastruktur (Fahrzeug und Haltestellen)

Strafpunkte für Nichterfüllung von Anforderungen

- Barrierefreiheit
- Klimatisierung
- visuelle und akustische Fahrgast-Infos
- ausreichend Sitzplätze
- ausreichend Platz für Gepäck
- subjektive Sicherheit
- ...

### Umstiege

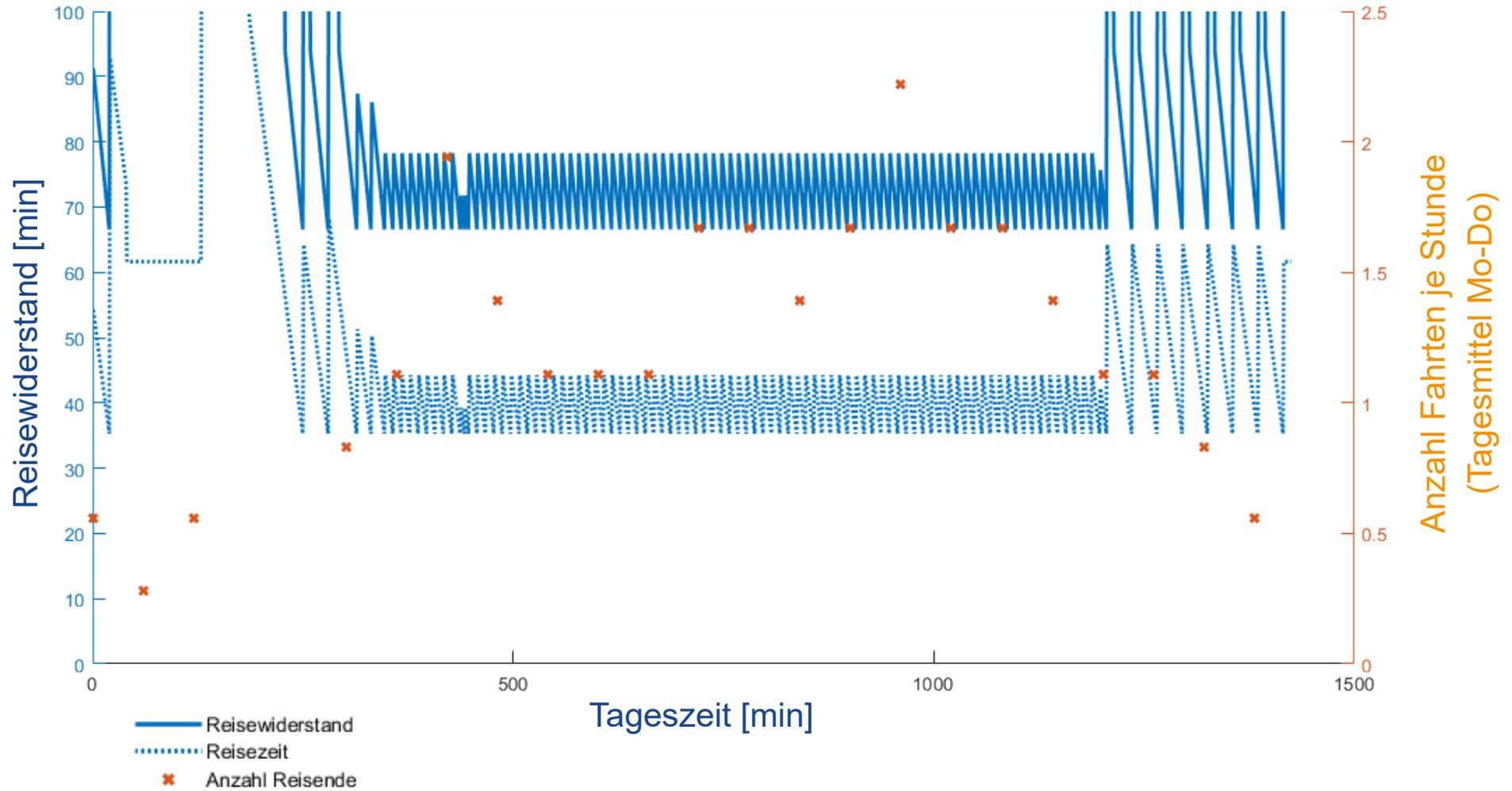
- $n$  Anzahl Umstiege
- $m = n + 1$  Anzahl Routenabschnitte

$a$  *absteigende Routenabschnitte* = *absteigend*  $(t_{\text{Abschnitt}_1}, \dots, t_{\text{Abschnitt}_m})$

$$r = \sum_n 8 + \frac{\text{absteigende Routenabschnitte}(n)}{2}$$

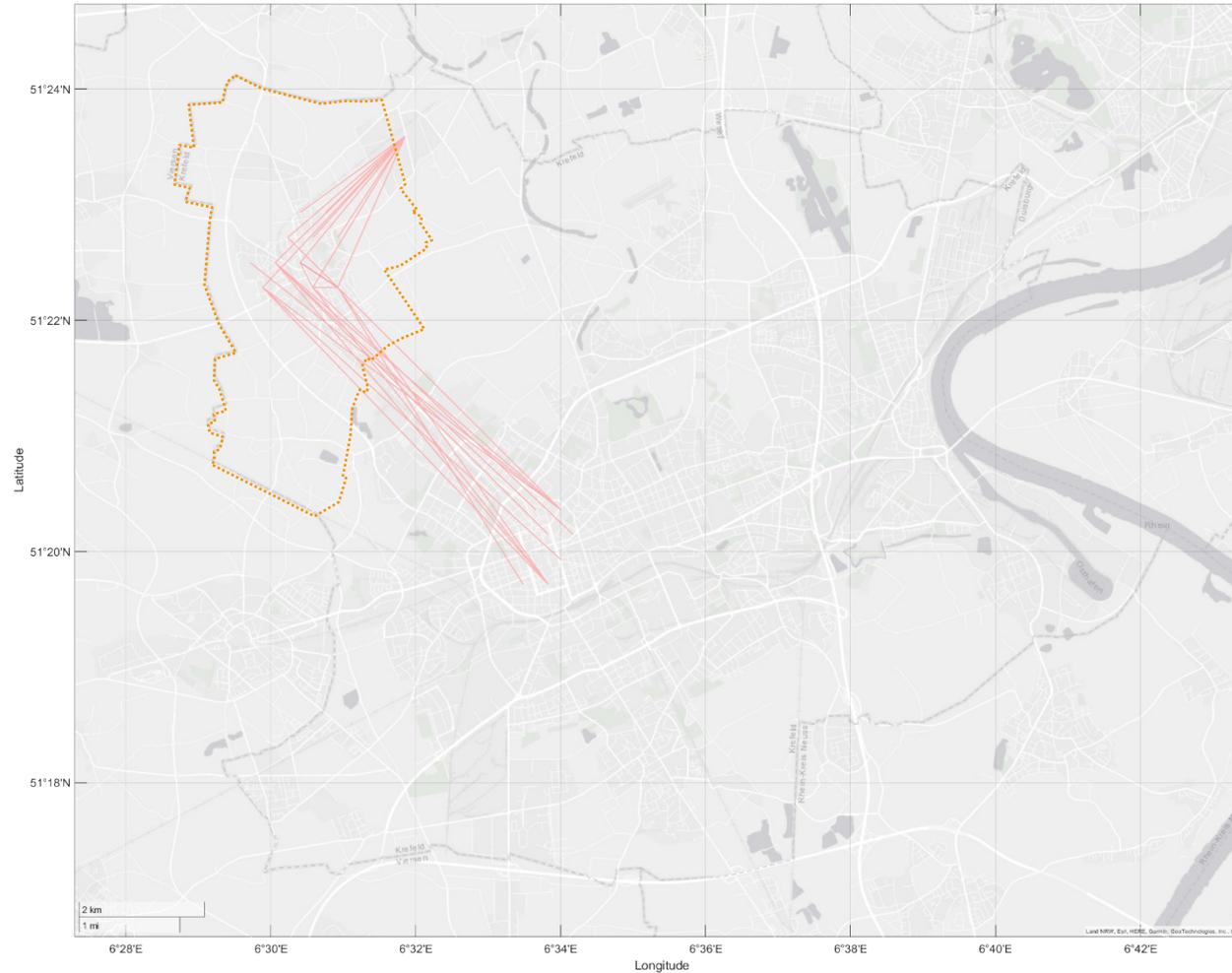
# Reisewiderstände

## ÖPNV Unannehmlichkeiten



# Ergebnisauszug

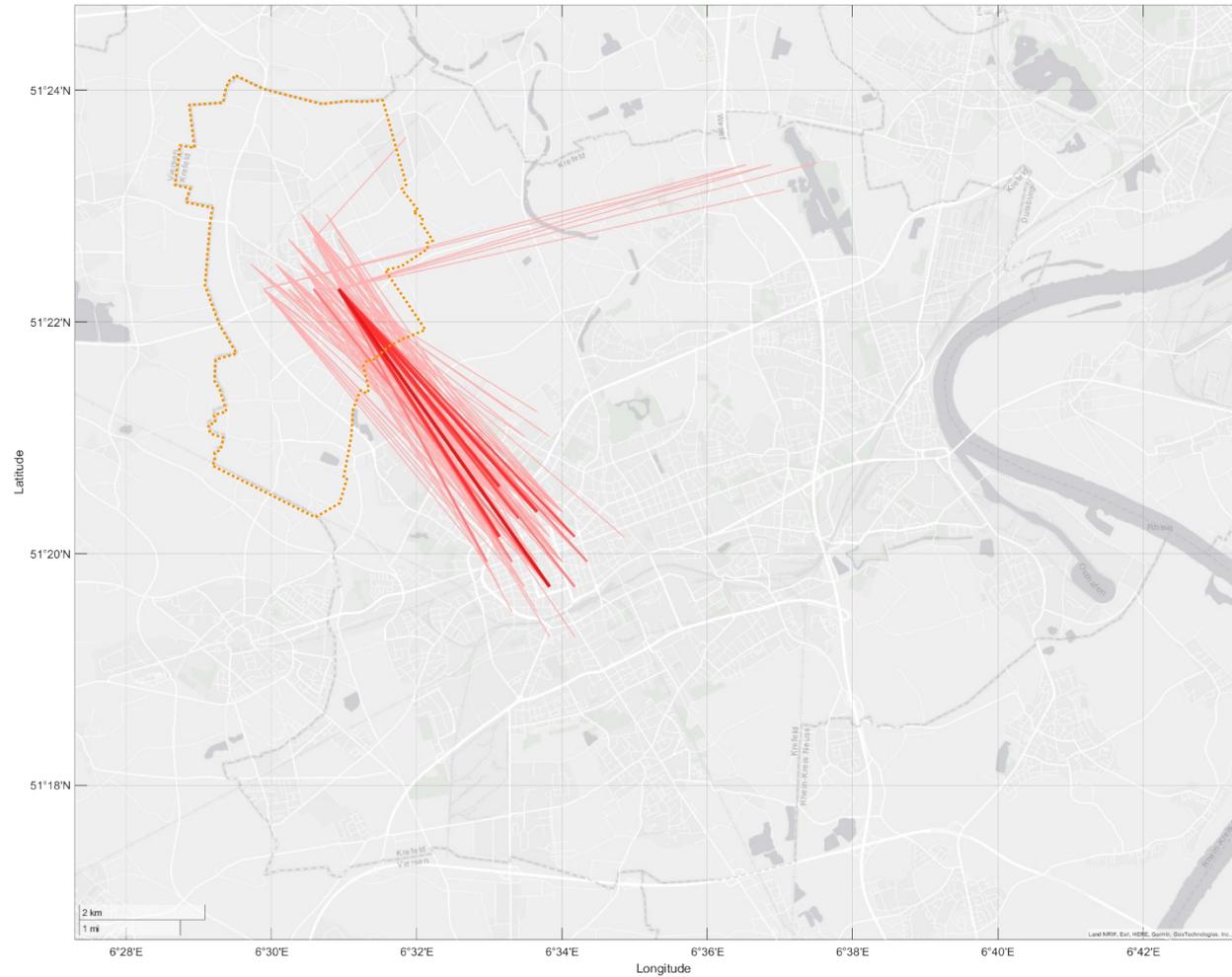
## Reisen mit Start im Stadtteil Hüls



05:00 - 06:00 Uhr

# Ergebnisauszug

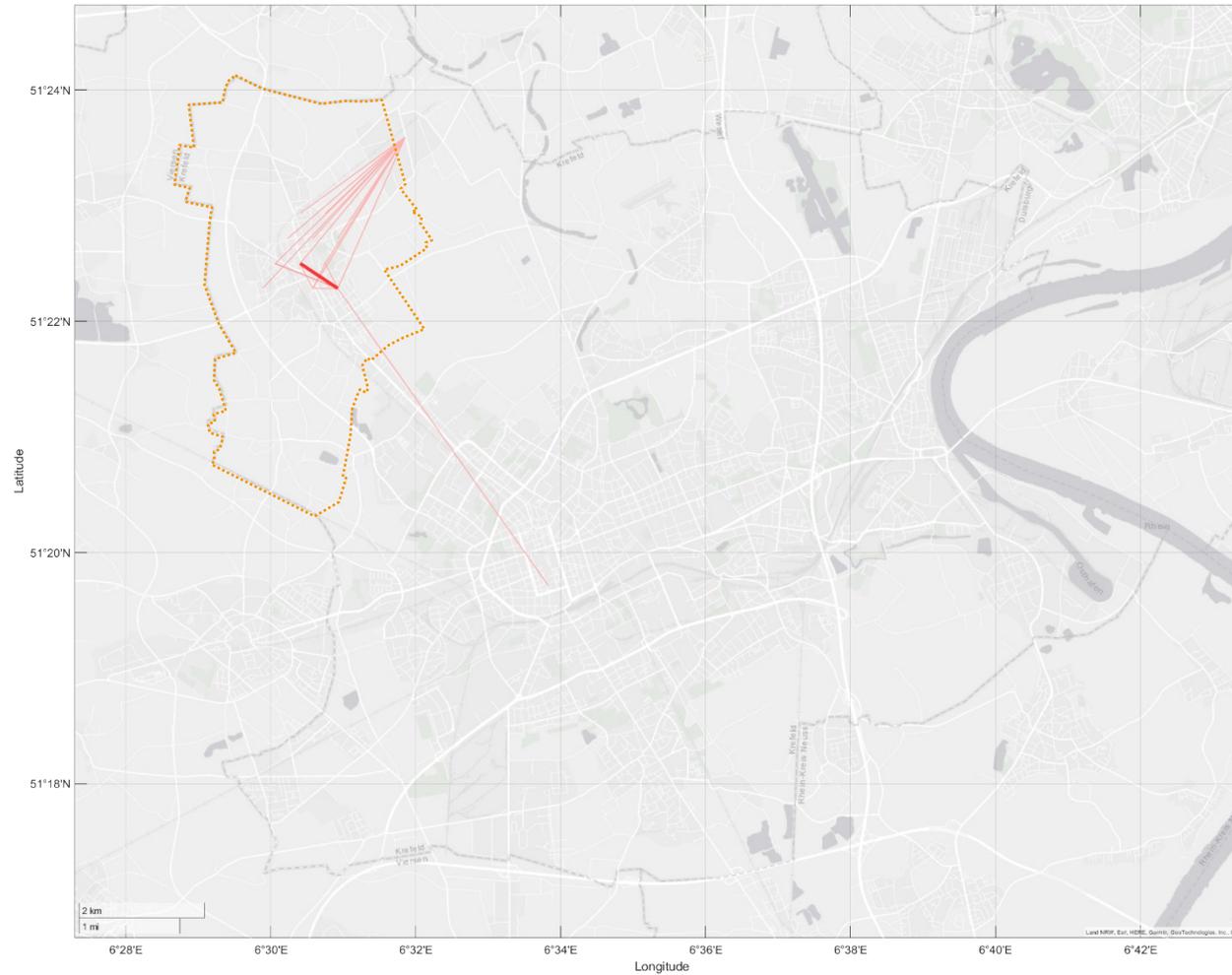
## Reisen mit Start im Stadtteil Hüls



07:00 - 08:00 Uhr

# Ergebnisauszug

## Reisen mit Start im Stadtteil Hüls



18:00 - 19:00 Uhr

# Interpretation

## Verbesserungsempfehlungen

- Ringbuslinie durch **Ridepooling** ersetzen
  - 6 und 18-Sitzer
  - Zubringer zum ÖPNV
  - Tür-zu-Tür Verbindungen
- **Straßenbahnlinie** beschleunigen
  - weniger Haltestellen
  - Beschleunigungsschaltung an Lichtsignalanlagen

### Ridepooling-Gebiet



# Ausblick

## Modellverbesserungen

- spezifischen ÖPNV-Reisewiderstand auf MIV-Reisewiderstand und nicht auf Luftlinie beziehen
  - bessere Vergleichbarkeit von Innenstadt und Stadtrand bzw. ländlichen Regionen
- Transformierung der Mobilfunkzellen in Mobilitätsmodell mit gewichteten Gebäudeflächen nach Nutzungsart und Mobilitätszweck

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

## Kontakt

**Lukas Spengler, M.Sc.**

lukas.spengler@hs-niederrhein.de

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

Hochschule Niederrhein

Reinarzstr. 49

47805 Krefeld, Deutschland

Ministerium für Verkehr  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Hochschule Niederrhein  
University of Applied Sciences  
SWK E<sup>2</sup>

**MECHATRONIK**   
Universität Duisburg-Essen | www.imech.de

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*



Ministerium für Verkehr  
des Landes Nordrhein-Westfalen



*Offen im Denken*



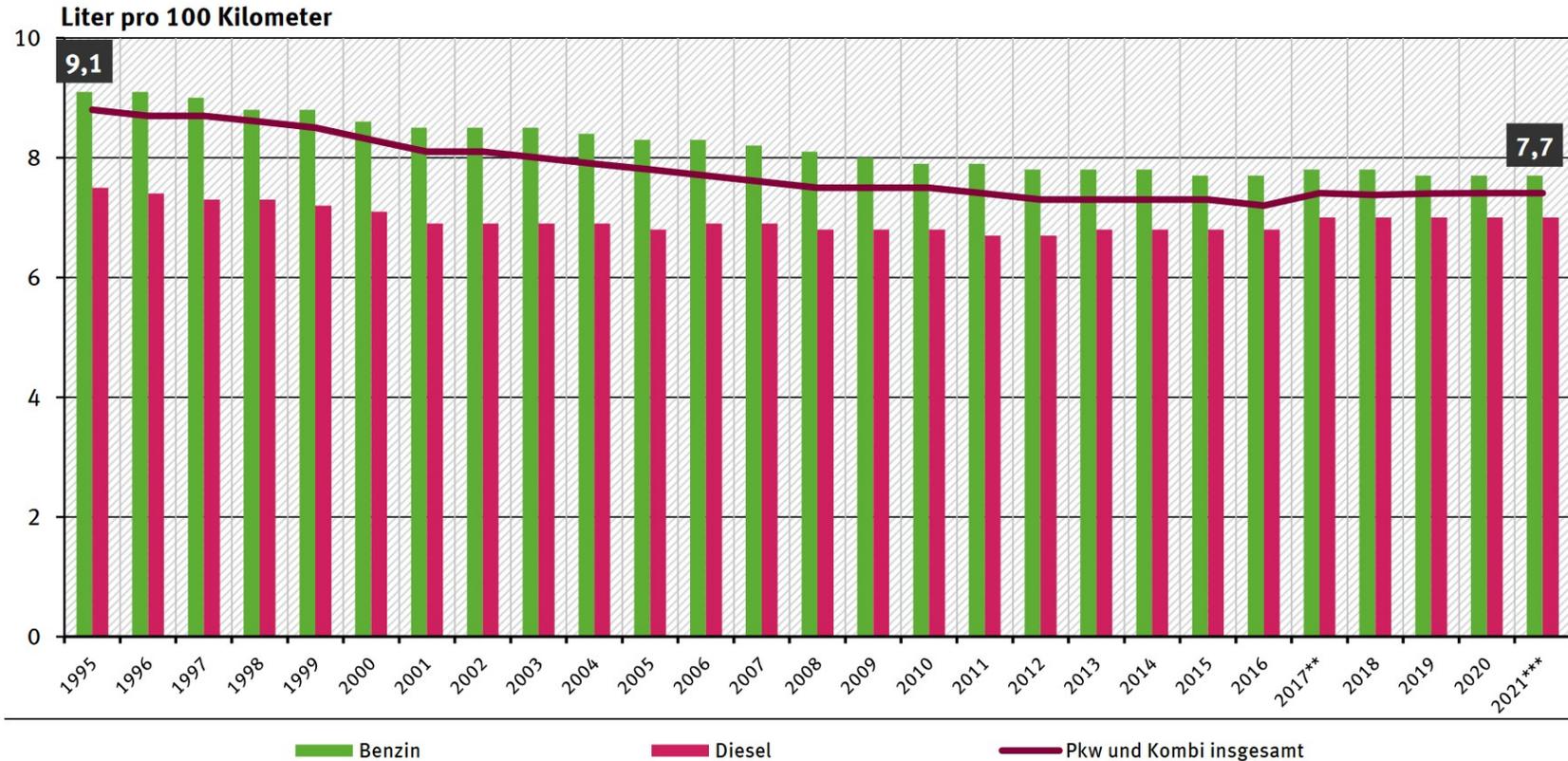
**Hochschule Niederrhein**  
University of Applied Sciences

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

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

# Einleitung

## Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch von Pkw und Kombi in Deutschland\*



\* Errechnet auf Basis der Inländerfahrleistung (einschließlich Auslandsstrecken deutscher Kfz und ohne Inlandsstrecken ausländischer Kfz).

\*\* ab 2017 Neuberechnung der Fahrleistungs- und Verbrauchsrechnung

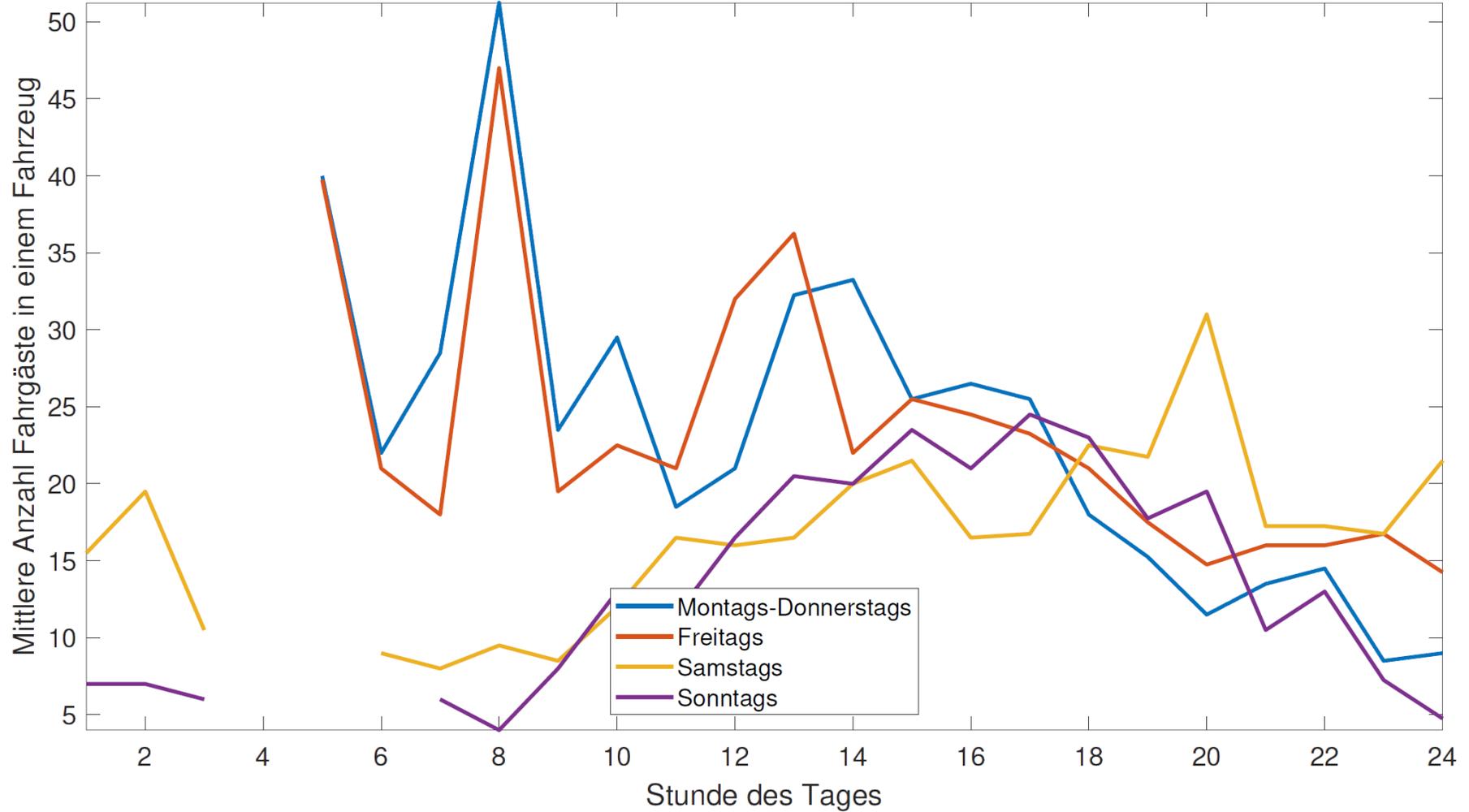
\*\*\* zum Teil vorläufige Werte

Quelle: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), Verkehr in Zahlen 2022/2023, S. 309

# Stand der Technik

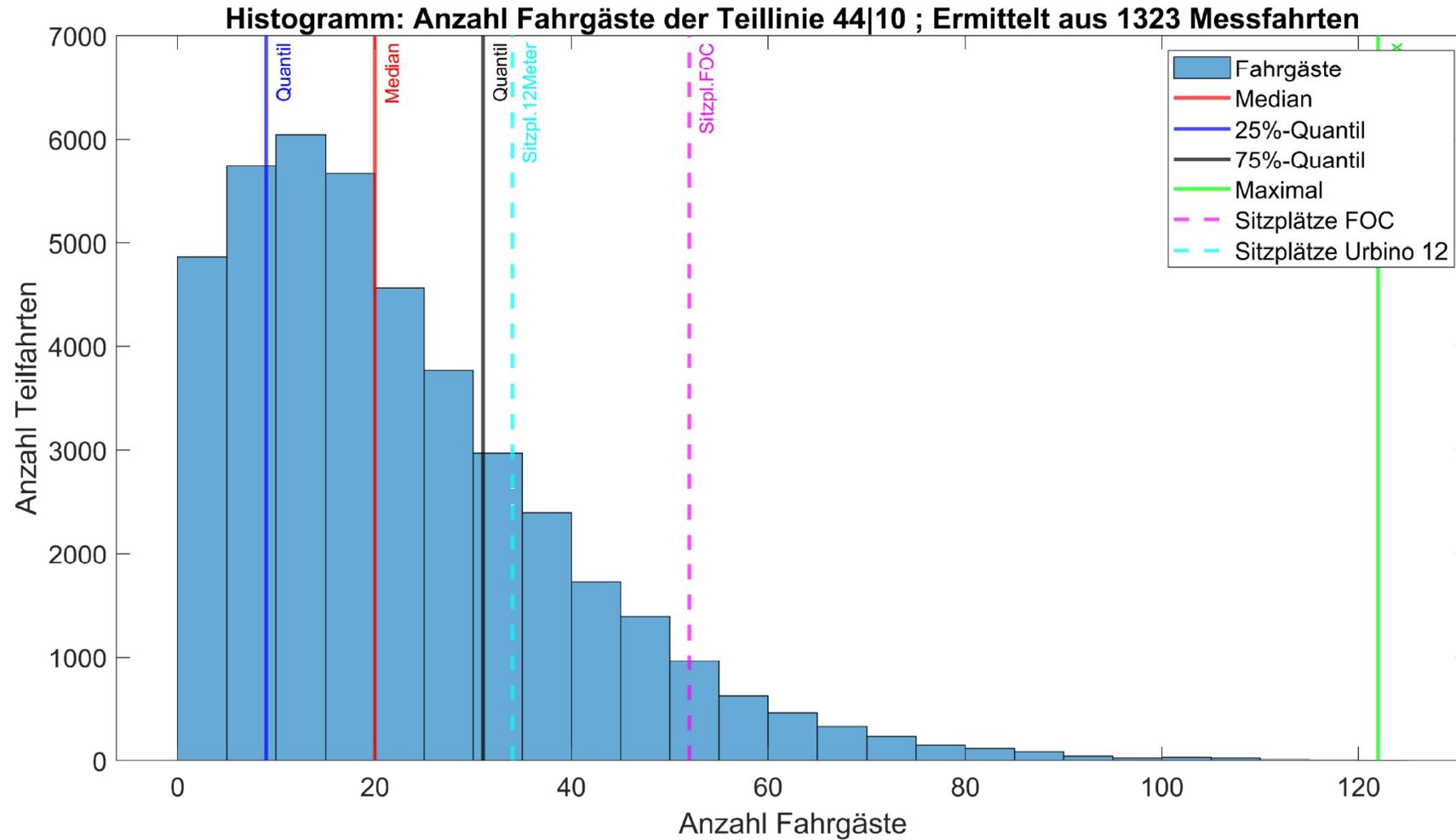
## Besetzungsgrade messen

Anzahl Fahrgäste nach Uhrzeiten, Median, Stundenweise, Teillinie 44|10



# Aktuelle Methoden

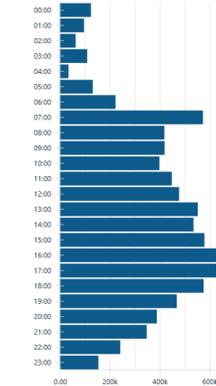
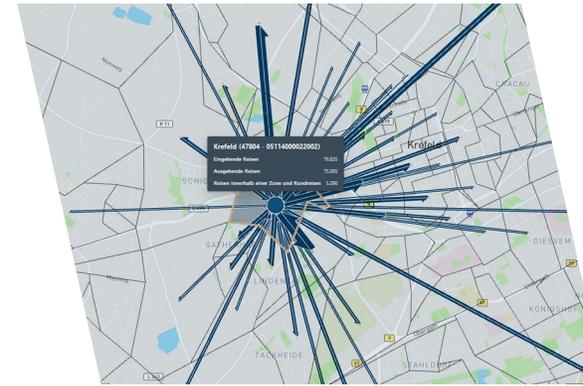
## Besetzungsgrade messen



# Mobilfunkdatenauswertung

## Forschungsfragen

- Wie gut deckt das Mobilitätsangebot den Bedarf?
- An welchen Stellen können **Anpassungen am Angebot** sinnvoll sein?



## Methodik



- Auswahl von zeitlichen und räumlichen **Filtern** ✓
- Herausforderung: **DSGVO**
  - Auf 5 Reisen gerundet, bei < 5 auf 0 abgerundet
  - je feiner Auflösung, desto größer der Fehler
- Lösungsansatz: iteratives **Gruppieren** von Zellen in unterschiedl. Detailstufen

- **Extrapolation:** von grob nach fein
- nächst feinere Detailstufe muss in Summe gleich viele Reisen haben, wie darüberliegende Stufe
- **Vergleich** mit Mobilitätsumfragen BestMOD 2023, Helmert 2017

- Verkehrszellen matchen

- ÖPNV-Routing
- **Reisewiderstand**
  - Fußweg zur Haltestelle
  - Umstiege
  - Fahrzeit
  - ...

- Ergebnis: **Heatmap** je Stunde

		Bedarf	
		niedrig	hoch
Widerstand	niedri	Überangebot? → Besetzungsgrade prüfen	gut
	hoch	gut	Ausweitungspotential

Weitere Nutzung in BestMOD für vertiefende Potentialanalysen **mein SWCAR**



# Datenbasis

## Zeitliche Filter

Mai 2023

...

Keine Ferien August 2022

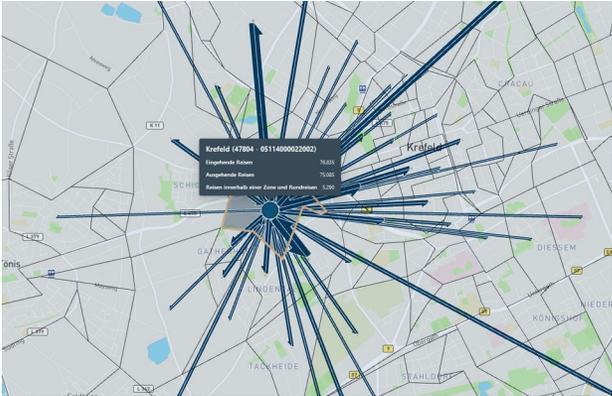
Wochentage (Mo-Do)

Juli 2022

Juni 2022

## Räumliche Filter

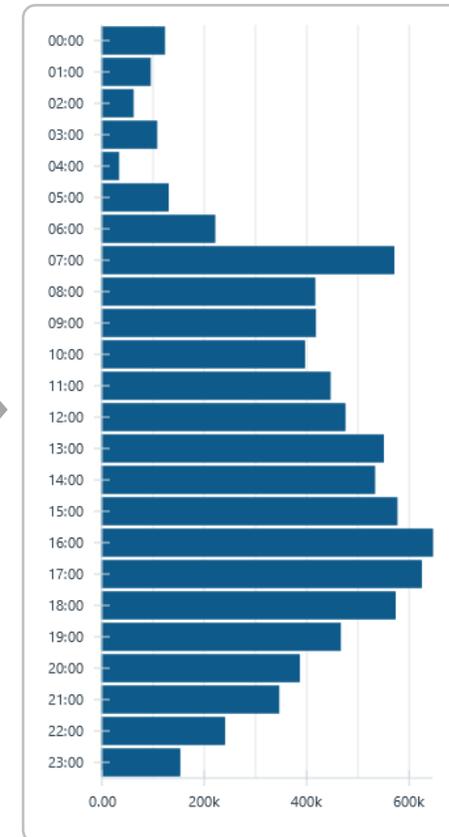
z. B. alle Wege einer Verkehrszelle



oder Wege zwischen bestimmten Verkehrszellen

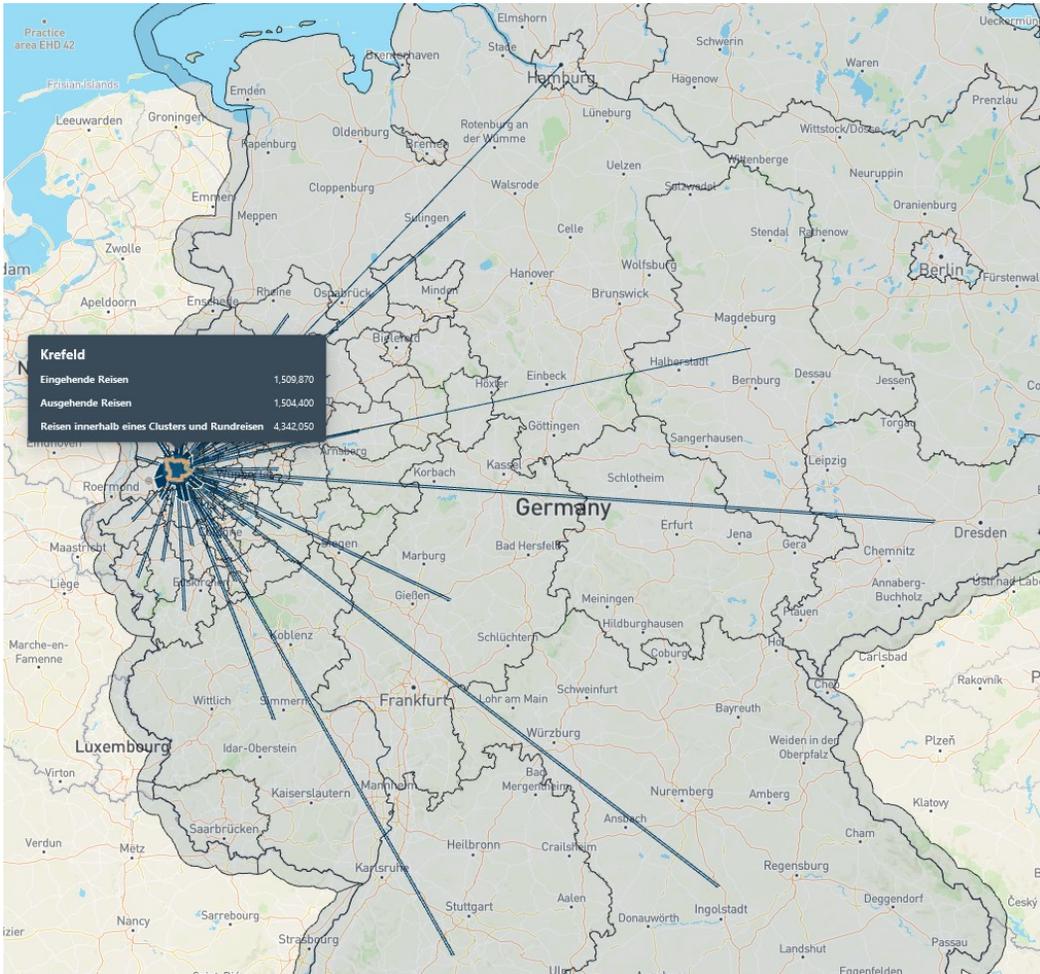


## Anzahl Reisen stündlich aufgelöst je Quelle-Ziel-Relation

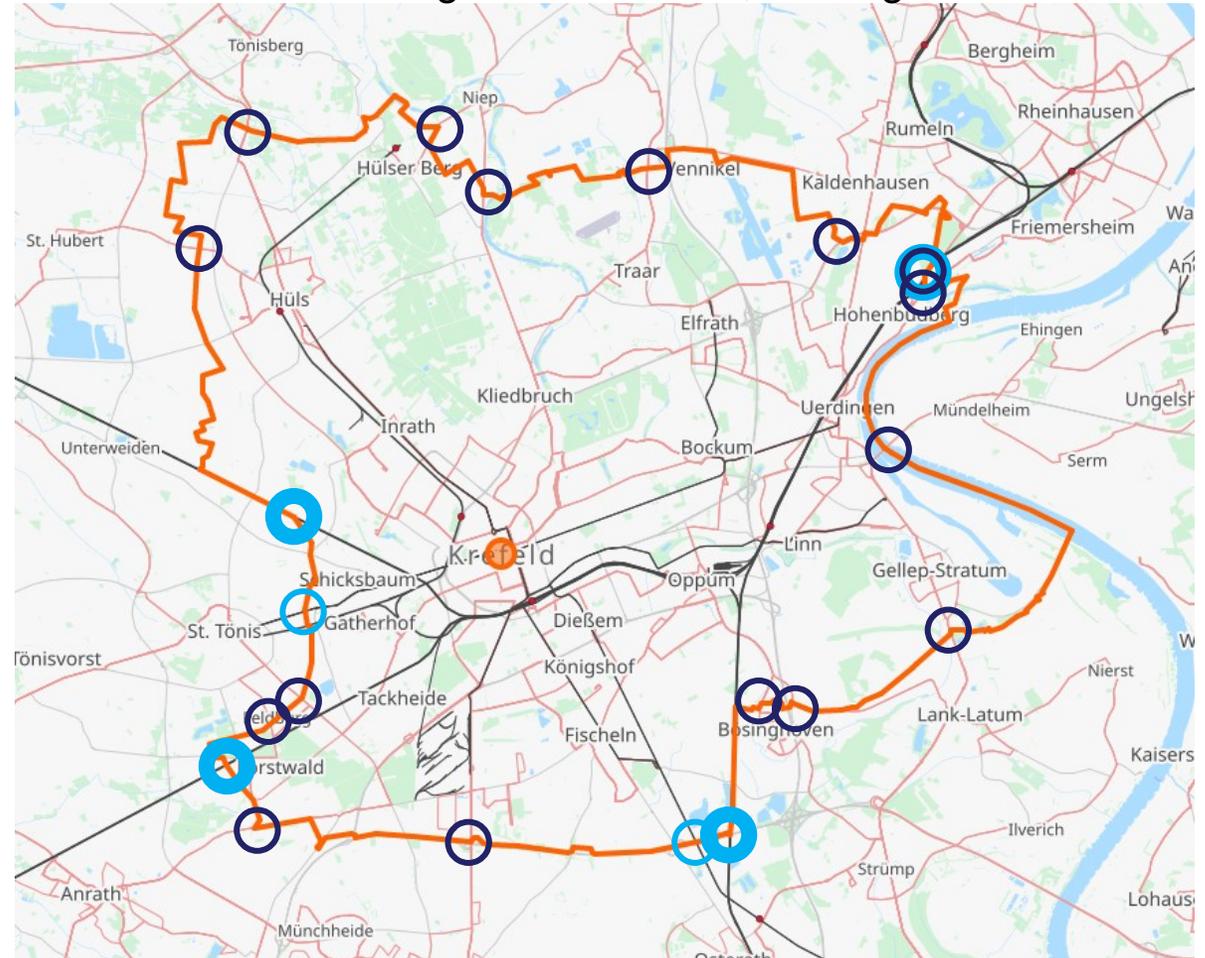


Import  
Matlab

# Überregionaler Verkehr



## Schnittstellen überregionaler Verkehr, Bilanzgrenze Krefeld



- Bus
- Regionalzug
- Straßenbahn/U-Bahn

Ministerium für Verkehr  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Hochschule Niederrhein  
University of Applied Sciences  
SWK E²

**MECHATRONIK**  
Universität Duisburg-Essen | www.imech.de

**UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN**

*Offen im Denken*