

# EFFIZIENZ VON LINIENBEDARFSVERKEHREN

Masterarbeit zum Thema „Simulationsbasierte Sensitivitätsanalysen anhand von Key-Performance-Indikatoren im On-Demand Verkehr“



**Ostfalia**

Hochschule für angewandte  
Wissenschaften



# Wie effizient kann LBV sein? Masterarbeit

- Ziel: Analyse des Zusammenhangs von Nachfrage, Dispositionsalgorithmus, Angebotsqualität und Fahrzeuganzahl
- Methode: modellbasierte mikroskopische Verkehrssimulation
- Tool: [SUMO](https://www.eclipse.org/sumo/) – Simulation of Urban Mobility
  - <https://www.eclipse.org/sumo/>

Malte Wolf (Ostfalia Hochschule), Benedikt Scheier (DLR, Institut TS),  
01.12.2022



**Ostfalia**  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften  
Fakultät Verkehr-Sport-Tourismus-Medien



Simulationsbasierte Sensitivitätsanalyse anhand  
von Key-Performance-Indikatoren im On-  
Demand Verkehr

**Malte Wolf**

(Matrikelnummer: 70459382)

Eingereichte Masterarbeit

im Studiengang

Verkehr und Logistik

an der

Karl-Scharfenberg-Fakultät

der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften

Erster Prüfer: Prof. Dr. Gerko Santel

Eingereicht am: 09.09.2022

Zweiter Prüfer: Prof. Dr. Tamás Kurczveil

Betreuer: Benedikt Scheier, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

# Wie effizient kann LBV sein?

## Effizienz – Metrik



Ostfalia  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften



- Ziel: Möglichst wenig Fahrzeugeinsatz, um möglichst viele Personen von A nach B zu bringen
  - Fahrzeugeinsatz: Fahrzeugkilometer
  - Personen von A nach B: Gebuchte Personenkilometer
- Vergleich zu MIV und Taxi möglich
- Vergleich zu Linienbus nur eingeschränkt sinnvoll, da Fahrzeugtyp unterschiedlich

$$\text{Betriebliche Effizienz} = \frac{\text{Personenkilometer gefahren (Pkm)}}{\text{Fahrzeugkilometer gesamt (Fzgkm)}}$$

$$\text{Systemeffizienz} = \frac{\text{Personenkilometer gebucht (Pkm)}}{\text{Fahrzeugkilometer gesamt (Fzgkm)}}$$

$$\text{Umwegfaktor} = \frac{\text{Personenkilometer gefahren (Pkm)}}{\text{Personenkilometer gebucht (Pkm)}}$$

Quelle: P. D. C. Liebchen, P. D. M. Lehnert, D. C. Mehlert und D. M. Schiefelbusch, „Betriebliche Effizienzgrößen für Ridepooling-Systeme,“ Springer Verlag, Universität Duisburg-Essen, 2020.

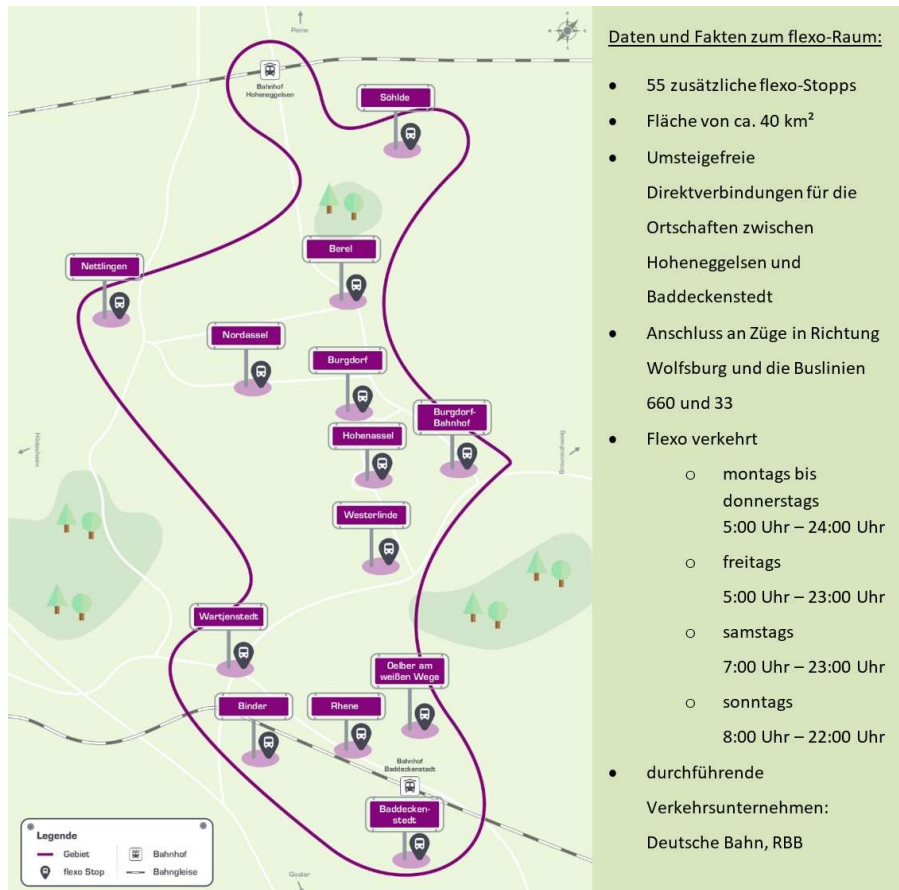
Zu beachten: **Umweg hat großen Einfluss auf Betriebliche Effizienz** → Betriebliche Effizienz steigt wenn der Umweg steigt



# Sumo – Modell Modell ländlicher Raum

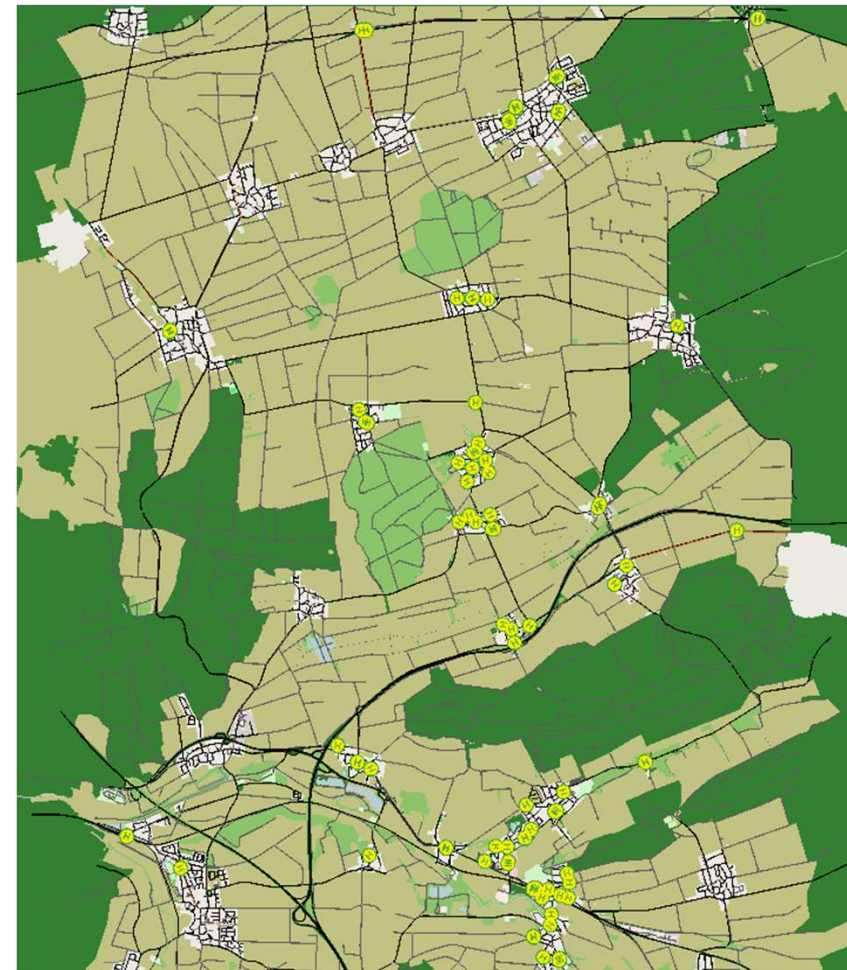


**Ostfalia**  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften



Quelle: <https://www.flexo-bus.de/>

Malte Wolf (Ostfalia Hochschule), Benedikt Scheier (DLR, Institut TS),  
01.12.2022



Quelle: Simulationsmodell mit SUMO

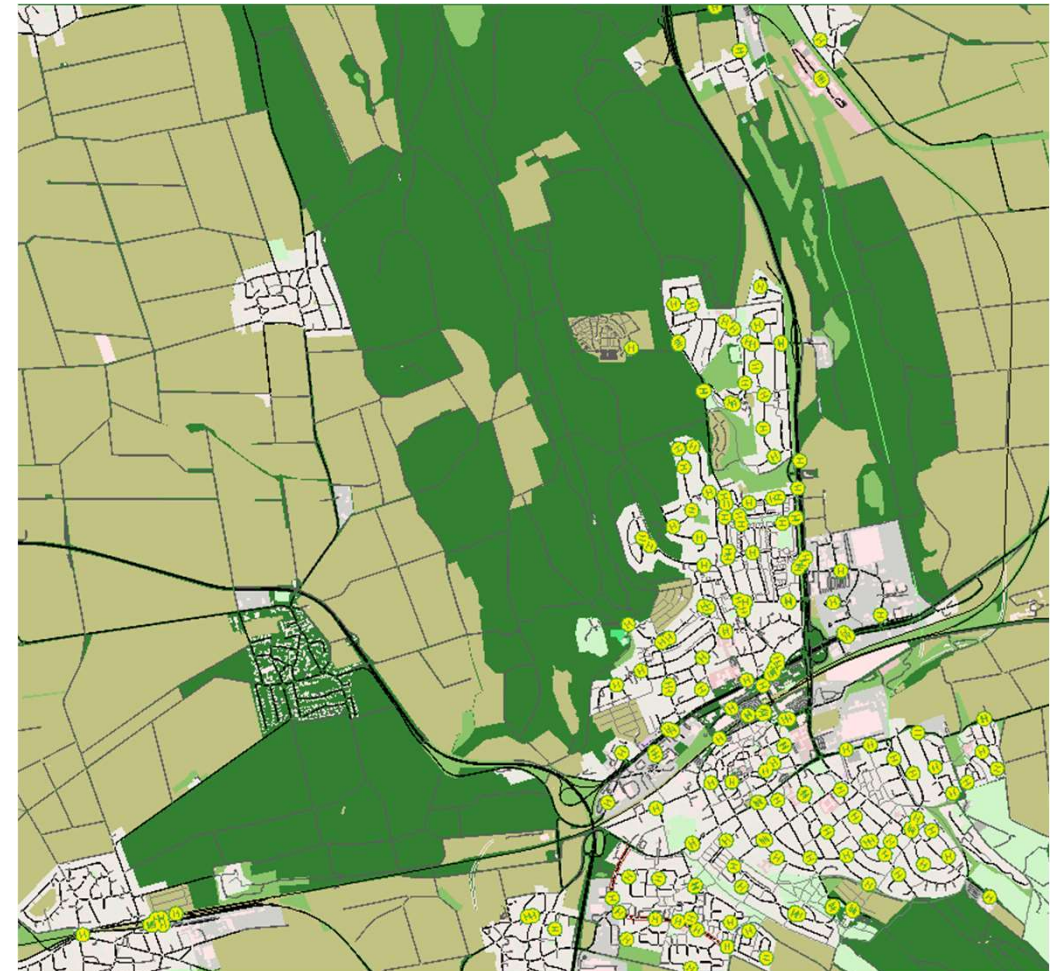
# SUMO – Modell Modell städtischer Raum



Ostfalia  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften



Quelle: <https://www.flexo-bus.de/>



Quelle: Simulationsmodell mit SUMO



# SUMO – Modell

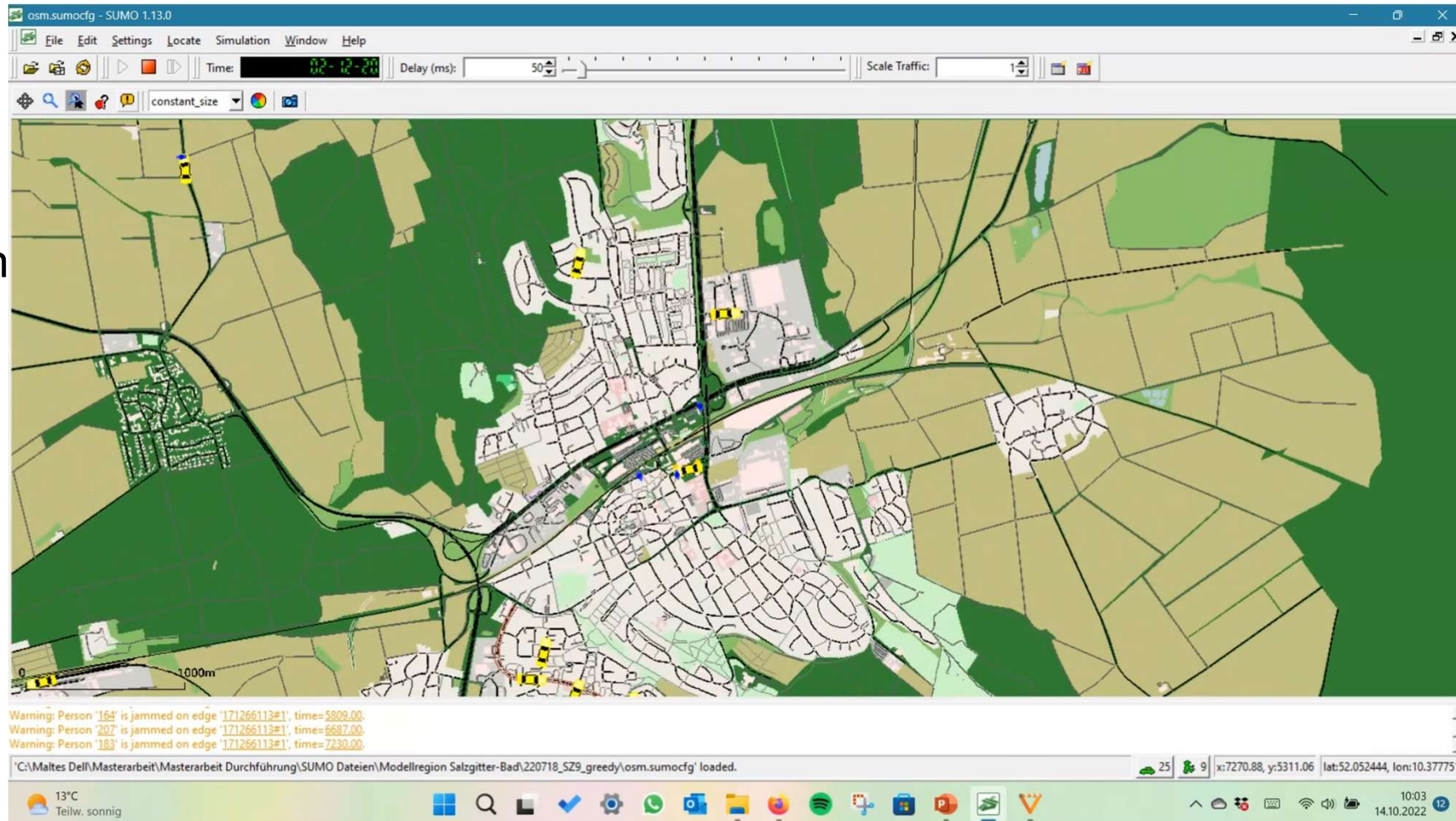


Ostfalia  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften



## Reisekette:

- Fuß
- (Mit)Fahren
- Fuß



Malte Wolf (Ostfalia Hochschule), Benedikt Scheier (DLR, Institut TS),  
01.12.2022

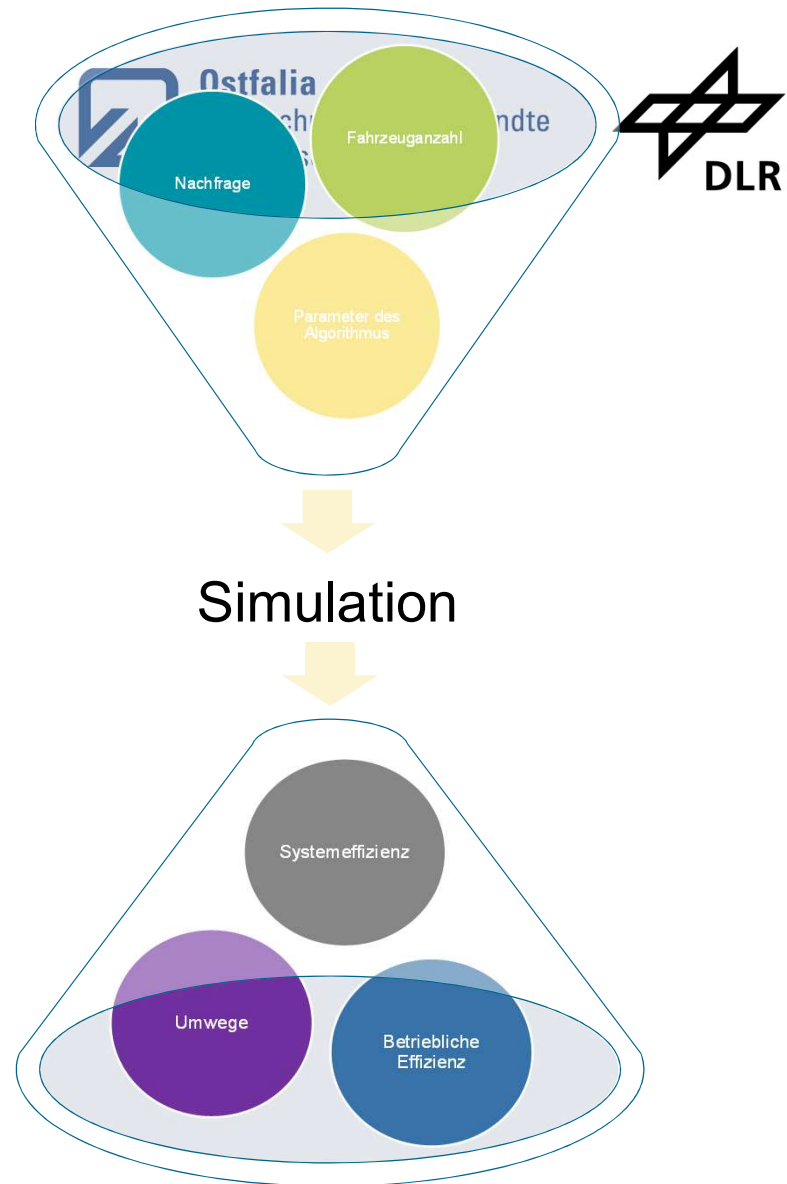
Quelle: Simulationsmodell mit SUMO

# Durchführung der Simulationen

1. Parameter des Algorithmus festlegen
2. Fahrzeuganzahl festlegen
3. Nachfrage festlegen
4. Simulationsdurchlauf → Mindestens ein Durchlauf pro Veränderung
5. Auswertung

Simulation ID	Quelle TAZ		Ziel TAZ		Intervall [s]		Nachfrage [1]/h	Nachfrage [%]	Nachfrage [1]/3h
	TAZ ID	TAZ Name	TAZ ID	TAZ Name	Beginn	Ende			
SZ12	taz_0	Bhf Ringelheim	taz_0	Bhf Ringelheim	0	3600	0	0,00	0
	taz_0	Bhf Ringelheim	taz_1	SZ-Bad	0	3600	15	15,00	45
	taz_0	Bhf Ringelheim	taz_2	Ostfalia	0	3600	2	2,00	6
	taz_0	Bhf Ringelheim	taz_3	SZ Randgebiet	0	3600	0	0,00	0
	taz_1	SZ-Bad	taz_0	Bhf Ringelheim	0	3600	15	15,00	45
	taz_1	SZ-Bad	taz_1	SZ-Bad	0	3600	0	0,00	0
	taz_1	SZ-Bad	taz_2	Ostfalia	0	3600	8	8,00	24
	taz_1	SZ-Bad	taz_3	SZ Randgebiet	0	3600	25	25,00	75
	taz_2	Ostfalia	taz_0	Bhf Ringelheim	0	3600	2	2,00	6
	taz_2	Ostfalia	taz_1	SZ-Bad	0	3600	8	8,00	24
	taz_2	Ostfalia	taz_2	Ostfalia	0	3600	0	0,00	0
	taz_2	Ostfalia	taz_3	SZ Randgebiet	0	3600	0	0,00	0
	taz_3	SZ Randgebiet	taz_0	Bhf Ringelheim	0	3600	0	0,00	0
	taz_3	SZ Randgebiet	taz_1	SZ-Bad	0	3600	25	25,00	75
	taz_3	SZ Randgebiet	taz_2	Ostfalia	0	3600	0	0,00	0
	taz_3	SZ Randgebiet	taz_3	SZ Randgebiet	0	3600	0	0,00	0
Eigene Darstellung							100	100,00	300

Malte Wolf (Ostfalia Hochschule), Benedikt Scheier (DLR, Institut TS),  
01.12.2022



Eigene Darstellung

# Ergebnisse

## Effizienz in Abhängigkeit des DRF<sup>1</sup>



### Betreiber wünscht hohe Effizienz

- Hoher DRF<sup>1</sup> = Hohe Fahrtenbündelung
- Geringe Fahrzeugkilometer
- hohe Umwege
- Aber: Angebotsqualität sinkt
  - Vorbuchungszeiten steigen, um auf Fahrtenbündelung zu warten
  - Reisezeiten steigen auch, da Umweg steigt
- Umwegfaktor im arithmetischen Mittel bis ~1,5 (Entfernung) bzw. ~1,8 (Zeit)
- Umwegfaktor Median ~1,3 (Entfernung)

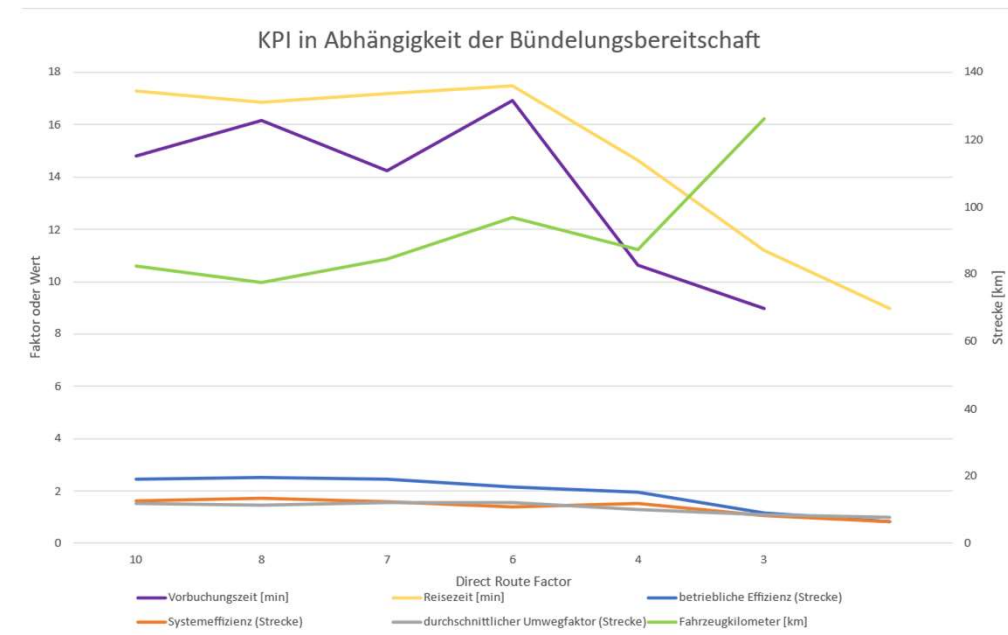


Abbildung 21: Verschiedene KPI in Abhängigkeit der Bündelungsbereitschaft eines Fahrzeugs

<sup>1</sup> DRF = DirectRouteFactor → „Bündelungsbereitschaft“



# Ergebnisse Effizienz & Fahrzeuganzahl



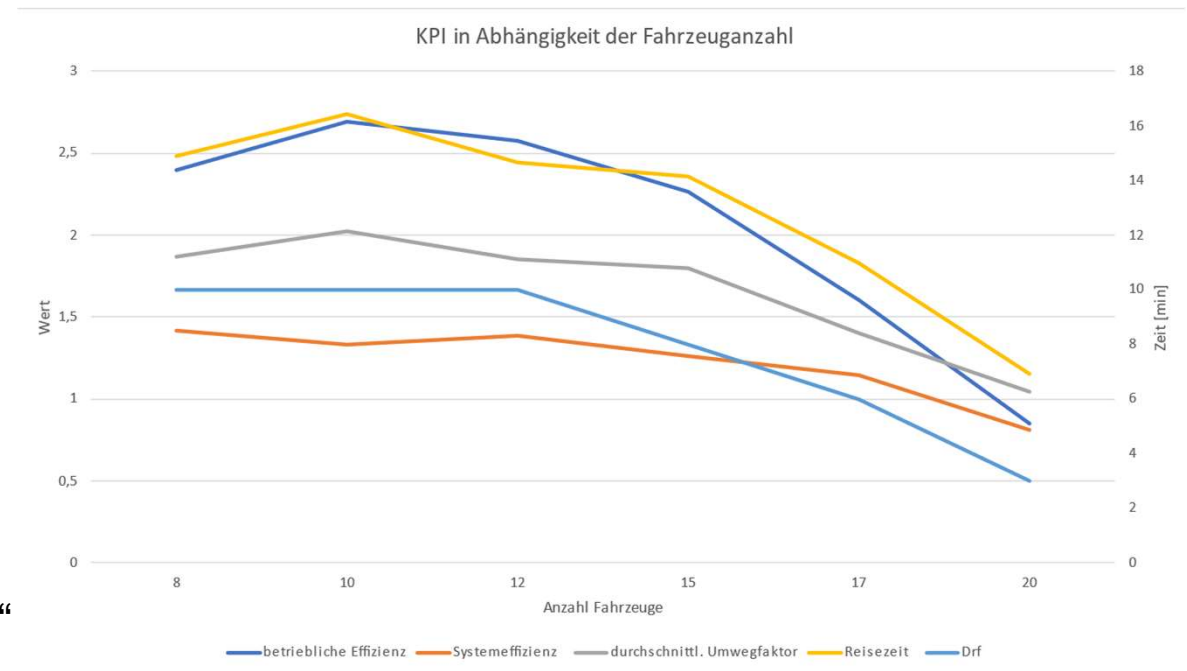
Ostfalia  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften



## Salzgitter-Bad (städtisches Gebiet)

Effizienzen in Abhängigkeit der  
Fahrzeuganzahl

- Steigende Fahrzeuganzahl
  - ✓ Fahrtenbündelung sinkt
  - ✓ Sinkende Effizienzen
  - ✓ Sinkender Umweg & Reisezeit → mehr Fahrzeuge → direkte Wege
- DRF wurde angepasst, damit Fahrzeuge überhaupt genutzt werden
- Für eine Nachfrage gibt es eine „optimale“ Fahrzeuganzahl



**Abbildung 26:** Sensitivitäten der Fahrzeuganzahl in SZ9

# Ergebnisse Effizienz & Nachfrage



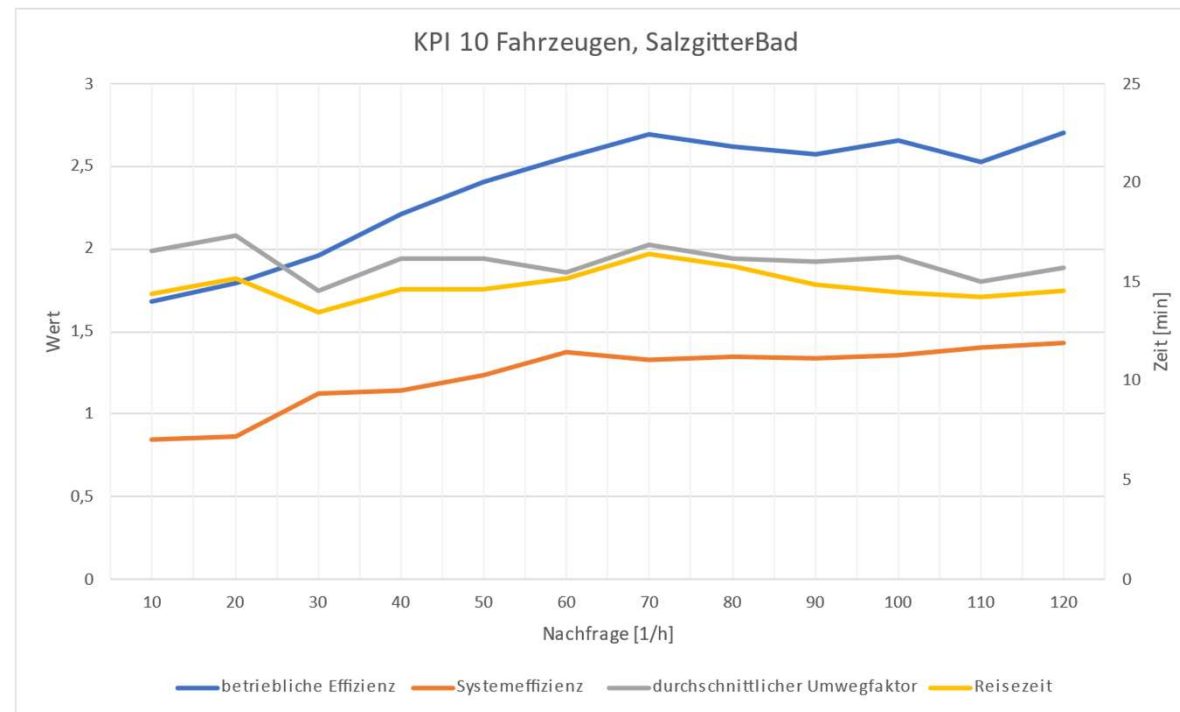
Ostfalia  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften



## Salzgitter-Bad (städtisches Gebiet)

Effizienzen in Abhängigkeit der Nachfrage

- Steigende Nachfrage
  - ~ 2,6 max. betriebliche Effizienz
  - ~ 1,4 max. Systemeffizienz
  - ~1,7 mittlerer Umwegfaktor (Entfernung)
- gleichbleibender Umweg und Reisezeiten → Algorithmus nutzt Fahrzeugkapazität bei geringer Nachfrage nicht aus
- Die Effizienz läuft einem maximalen Wert entgegen → Simulationen mit höher Nachfrage und Fahrzeugzahl ergaben keine höheren Effizienzen



**Abbildung 27:** Effizienzen, Umwegfaktor und Reisezeit bei konstanter Fahrzeuganzahl im Überblick

# Ergebnisse Effizienz & Nachfrage



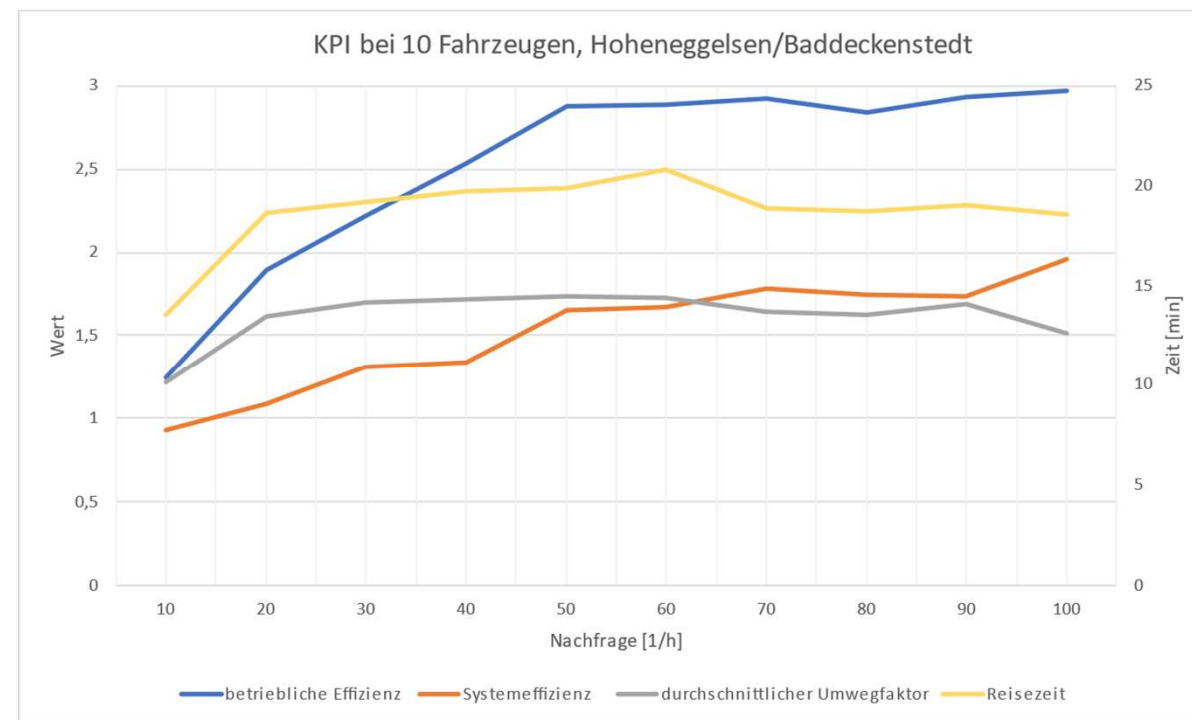
Ostfalia  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften



## Hoheneggelsen/Baddeckenstedt (ländliches Gebiet)

Effizienzen in Abhängigkeit der Nachfrage

- Steigende Nachfrage
  - ~ 2,9 max. betriebliche Effizienz
  - ~ 1,8 max. Systemeffizienz
  - ~1,7 mittlerer Umwegfaktor (Entfernung)
- gleichbleibender Umweg und Reisezeiten → Algorithmus nutzt Fahrzeugkapazität nicht aus
- Die Effizienz läuft einem maximalen Wert entgegen → Simulationen mit höher Nachfrage und Fahrzeugzahl ergaben keine höheren Effizienzen



**Abbildung 37:** Effizienzen, Umwegfaktor und Reisezeit bei konstanter Fahrzeuganzahl im Überblick



# Ergebnisse

## Effizienz in Abhängigkeit des Umwegfaktors

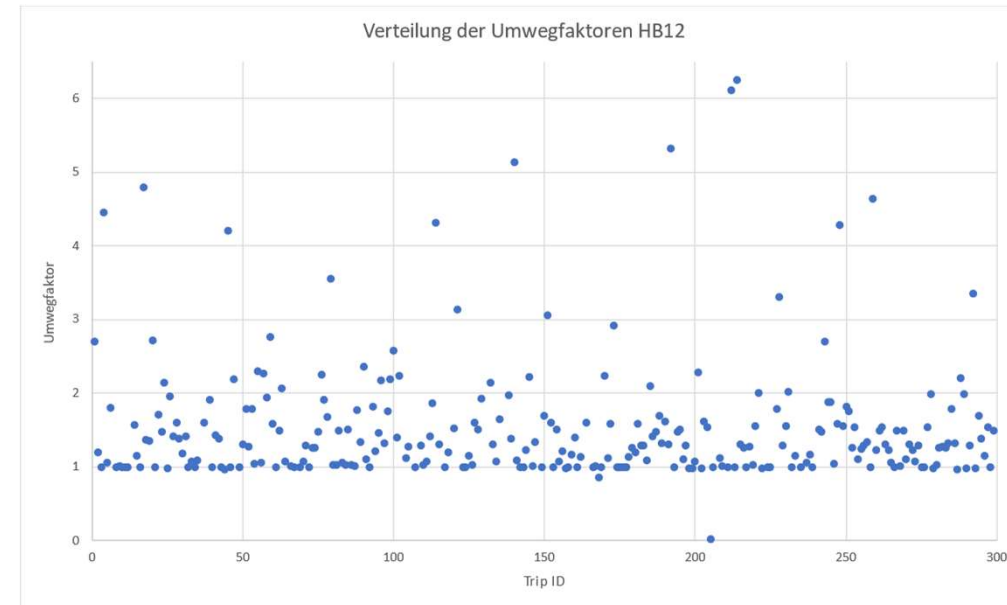


Ostfalia  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften



- Für hohe Effizienzen bzw. hohe Fahrtenbündelung, müssen Umwege  $>$  Faktor 2 angenommen werden
- 5,5 % der Buchungen Umwegfaktor  $>$  3
- 1,6 % der Buchungen Umwegfaktor  $>$  4

Umwege müssen in Kauf genommen werden  $\rightarrow$  Grenze für den Fahrgast?  $\rightarrow$  wenn die Personen nicht mitfahren was passiert dann?



**Abbildung 40:** Verteilung der Umwegfaktoren bei 300 Trips

# Ergebnisse

## Effizienz & Nachfrage



**Ostfalia**  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften



- Vergleich HB zu SZ:
  - Höhere Systemeffizienz:  $\sim 1,9 \leftrightarrow \sim 1,45$
  - Geringerer Umwegfaktor:
    - Entfernung 1,74 zu 2
    - Zeit 2,2 zu 2,8
- Richtungsband und größere Entfernungen haben positiven Effekt auf Effizienz
- Umwege über Straßen mit geringen Geschwindigkeiten lassen zeitlichen Umweg schnell größer werden → Virtuelle Haltestellen in Wohnvierteln (v.a. in Spielstraßen) vermeiden?!

Gehweg +25%  
Umwegfaktor (km) -10%  
Umwegfaktor (Zeit) -12,5%  
Systemeffizienz (km) +5,5%  
Systemeffizienz (Zeit) +12%

# Ergebnisse

## Fazit



Ostfalia  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften



- Nachfrage von ~30 Buchungen/Stunde notwendig, um Systemeffizienz über 1 zu erhalten
- Systemeffizienz über 1 nur zu erreichen, wenn höhere Umwege genommen werden
  - Mittlerer Umwegfaktor (Entfernung) von ~1,5 / Median von ~1,3
  - 5-10% der Buchungen haben Umwegfaktor über 3
- Nachfrage von 50-60 Buchungen/Stunde notwendig, um hohe Systemeffizienz zu erhalten (SZ: >1,4 bzw. HB: >1,6)
- Max. Systemeffizienzen im ländlichen Raum höher (~1,9 vs. ~1,5):
  - Größere Entfernungen und Richtungsbandcharakter haben positiven Einfluss auf Systemeffizienz
- Straßen mit geringen Geschwindigkeiten wirken sich negativ auf den zeitlichen Umwegfaktor aus





- Analyse Flexo: Warum laufen einige Regionen besser als andere? – Kooperation mit Regionalverband Großraum Braunschweig
- Analyse von Einflussfaktoren auf die Effizienz - Bachelorarbeit von Magnus Hamann (Ostfalia Hochschule), z.B.:
  - Netz (Raum, Geschwindigkeit, Haltestellendichte)
  - Nachfragestruktur (Pendler, Freizeit, Schüler)

# Vielen Dank für Ihr Interesse!



**Ostfalia**  
Hochschule für angewandte  
Wissenschaften



**Malte Wolf M.A.**

malte-wolf@gmx.de

**Benedikt Scheier M.Sc.**

DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Verkehrssystemtechnik

benedikt.scheier@dlr.de

0531 / 295 3428