



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)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Einführung, Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Methodisches Vorgehen	2
1.3 Leitfragen	3
1.4 Grundlegende Begriffe und Abgrenzung	4
2 Theoretische Grundlagen	7
2.1 Einordnung und Entwicklung im On-Demand Verkehr.....	7
2.2 SUMO	8
2.3 Die Modellregion Großraum Braunschweig	10
3 On-Demand Verkehre.....	12
3.1 Planung und Förderung	13
3.2 Best Practice Beispiele	15
3.2.1 Flexo	15
3.2.2 HUBCHAIN	16
3.2.3 On-Demand in Europa: IOKI.....	17
3.3 Potenziale, Probleme und Herausforderungen	19
3.3.1 Automatisierung und fehlende Technologien	21
3.3.2 Abhängigkeiten und Zusammenhänge der KPI.....	25
3.4 Key-Performance-Indikatoren und Parameter zur Analyse.....	27
4 Modellierung und Simulation	30
4.1 Methode: Simulationssoftware	30
4.2 Auswahl und Variation der Inputparameter.....	32
4.3 Auswahl der Modellregionen.....	33
4.4 Modellaufbau und Durchführung	35
4.4.1 Region 1: Salzgitter-Bad	36
4.4.2 Region 2: Hoheneggelsen/Baddeckenstedt.....	39
5 Auswertung und Sensitivitätsanalyse.....	41
5.1 Darstellung und Interpretation der Sensitivitäten: SZ-Bad	42
5.2 Darstellung und Interpretation der Sensitivitäten: Baddeckenstedt/Hoheneggelsen...	56
5.3 Vergleich der Modellregionen untereinander und allgemeine Schlüsse	68

6	Zusammenfassung und Ausblick	71
6.1	Zusammenfassung	71
6.2	Probleme, Ausblick und Potenziale	73
	Literaturverzeichnis	IX
	Anhang	XIII
	Eidesstattliche Erklärung.....	XXVIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modal Split des Verkehrsaufkommens nach Raumtyp.....	1
Abbildung 2: Zielkonflikte und deren Zusammenhänge, eigene Darstellung	4
Abbildung 3: Einordnung On-Demand Verkehre	7
Abbildung 4: Features von SUMO	9
Abbildung 5: Karte des Großraum Braunschweig	10
Abbildung 6: Klassischer Ablauf eines On-Demand Angebots	12
Abbildung 7: Vereinfachte schematische Darstellung eines Auswahlrasters zur Planung flexibler Bedienformen	13
Abbildung 8: Ablauf einer Flexo-Buchung.....	15
Abbildung 9: HUB CHAIN Fahrzeug	17
Abbildung 10: Die fünf Stufen des automatisierten Fahrens im Überblick	22
Abbildung 11: Parameter der Systemeffizienz und deren Zusammenhänge	26
Abbildung 12: Indikatoren der Systemeffizienz und deren Zusammenhänge; eigene Darstellung.....	26
Abbildung 13: MATSims DVRP- Erweiterung	31
Abbildung 14: Steckbrief flexo-Raum Salzgitter-Bad	33
Abbildung 15: Steckbrief flexo-Raum Baddeckenstedt/Hoheneggelsen	34
Abbildung 16: Modellregion Salzgitter-Bad in der Simulation mit TAZ	36
Abbildung 17: Beispiel einer Quelle-Ziel-Matrix für die Reisendenbewegung	37
Abbildung 18: Variation der Nachfrage und Anzahl der simulierten Fahrzeuge	38
Abbildung 19: Modellregion Hoheneggelsen/Baddeckenstedt in der Simulation mit TAZ	39
Abbildung 20: Variation der Nachfrage und Anzahl der simulierten Fahrzeuge	40
Abbildung 21: Verschiedene KPI in Abhängigkeit der Bündelungsbereitschaft eines Fahrzeugs	41
Abbildung 22: Fahrzeugkilometer, Anzahl Fahrgäste und Triplänge bei SZ9 und 7 Fahrzeugen	44
Abbildung 23: Fahrzeugkilometer, Anzahl Fahrgäste und Triplänge bei SZ9 mit 14 Fahrzeugen	45
Abbildung 24: Fahrzeugkilometer, Anzahl Fahrgäste und Triplänge bei SZ9 mit 8 Fahrzeugen.	45
Abbildung 25: Grafische Abbildung der Sensitivität von Fahrzeuganzahl und Nachfrage	46
Abbildung 26: Sensitivitäten der Fahrzeuganzahl in SZ9	47
Abbildung 27: Effizienzen, Umwegfaktor und Reisezeit bei konstanter Fahrzeuganzahl im Überblick.....	48
Abbildung 28: Verteilung der Umwegfaktoren bei 360 Trips	50
Abbildung 29: Vergleich der Histogramme „Bündelungsverkehr“ und gebuchter Weg	51
Abbildung 30: Anteil Leerkilometer an den Gesamtkilometern	52
Abbildung 31: Ausgabe der Simulationsergebnisse von SZ14	54
Abbildung 32: Vorbuchungszeit bei konstanter Fahrzeuganzahl.....	55
Abbildung 33: Grafische Abbildung der Sensitivität von Fahrzeuganzahl und Nachfrage	57
Abbildung 34: Vergleich HB9.....	57
Abbildung 35: HB9: Alle Fahrzeuge in Betrieb	58
Abbildung 36: Sensitivitäten der Fahrzeuganzahl in HB9	59
Abbildung 37: Effizienzen, Umwegfaktor und Reisezeit bei konstanter Fahrzeuganzahl im Überblick.....	61
Abbildung 38: HB11.2: Fahrzeugkilometer, Anzahl Fahrgäste und Triplänge	62

Abbildung 39: HB12: Fahrzeugkilometer, Anzahl Fahrgäste und Triplänge	63
Abbildung 40: Verteilung der Umwegfaktoren bei 300 Trips	64
Abbildung 41: Anteil Leerkilometer an den Gesamtkilometern	65
Abbildung 42: Vorbuchungszeit bei konstanter Fahrzeuganzahl.....	66
Abbildung 43: Zitat des Umweltbundesamts.....	75
Abbildung 44: Liste der Modellprojekte des BMDV.....	XIV
Abbildung 45: Schaubild Zielkonflikte und deren Zusammenhänge.....	XV
Abbildung 46: Auswertungstabelle der verschiedenen Szenarien Salzgitter-Bad (1).....	XVI
Abbildung 47: Auswertungstabelle der verschiedenen Szenarien Salzgitter-Bad (2).....	XVII
Abbildung 48: Auswertungstabelle der verschiedenen Szenarien Salzgitter-Bad (3).....	XVIII
Abbildung 49: Auswertungstabelle der verschiedenen Szenarien Salzgitter-Bad (4).....	XIX
Abbildung 50: Übersicht konstante Fahrzeuganzahl Salzgitter-Bad	XX
Abbildung 51: Übersicht KPI in einem Szenario Salzgitter-Bad.....	XXI
Abbildung 52: Auswertungstabelle der verschiedenen Szenarien Hoheneggelsen/Baddeckenstedt (1)	XXII
Abbildung 53: Auswertungstabelle der verschiedenen Szenarien Hoheneggelsen/Baddeckenstedt (2)	XXIII
Abbildung 54: Auswertungstabelle der verschiedenen Szenarien Hoheneggelsen/Baddeckenstedt (3)	XXIV
Abbildung 55: Auswertungstabelle der verschiedenen Szenarien Hoheneggelsen/Baddeckenstedt (4)	XXV
Abbildung 56: Übersicht Konstante Fahrzeuganzahl Hoheneggelsen/Baddeckenstedt.....	XXVI
Abbildung 57: Übersicht KPI in einem Szenario Hoheneggelsen/Baddeckenstedt	XXVII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Chancen und Risiken von Ridepooling; eigene Darstellung	20
Tabelle 2: Chancen und Risiken eines autonomen Ridepooling- Konzeptes	24
Tabelle 3: Grenzen der wichtigen KPI	71

Abkürzungsverzeichnis

AST	Anrufsammeltaxi
BMVI	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BSVG	Braunschweiger Verkehrs-GmbH
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Drf	Direct Route Factor
DRT	Demand Responsive Transport
EFRE	Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
Flexo	Markenname für flexible Bedienformen
IV	Individualverkehr
KPI	Key-Performance-Indikator
KVG	Kraftverkehrsgesellschaft mbH Braunschweig
LNVG	Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen
MiD	Mobilität in Deutschland
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NNVG	Niedersächsisches Nahverkehrsgesetz
ODV	On-Demand Verkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PKW	Personenkraftwagen
SUMO	Simulation of Urban Mobility
TAZ	Traffic Assignment Zones
Trip	Fahrt eines Fahrgastes im On-Demand Fahrzeug
RegG	Regionalisierungsgesetz

1 Einleitung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird innerhalb der vorliegenden Ausarbeitung das generische Maskulinum verwendet. Dennoch werden dabei stets weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

Die folgende Arbeit wurde fachlich betreut von Benedikt Scheier M.Sc., Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR).

1.1 Einführung, Problemstellung und Zielsetzung

In den letzten Jahren ist der Klimaschutz zu dem wichtigsten Ziel unserer Menschheit ausgesprochen worden. Die Mobilität, also die Fähigkeit sich zu bewegen, ist einerseits unverzichtbar für das Leben, jedoch auch einer der größte Treibhausgaserzeuger auf der Welt. Im Jahr 2019, und damit vor der Covid-19 Pandemie, war der Verkehrssektor für rund 20 % aller Treibhausgasemissionen Deutschlands verantwortlich. Der Verkehrs- und Mobilitätssektor ist der einzige Sektor, in welchem die Treibhausgasemissionen im letzten Jahrzehnt nicht gemindert werden konnten (vgl. [1]).

Im ländlichen Raum ist das Kraftfahrzeug immer noch das am stärksten benutzte Fortbewegungsmittel in Deutschland, wie die MiD- Studie von 2017 zeigt (Abbildung 1: Modal Split des Verkehrsaufkommens nach Raumtyp).

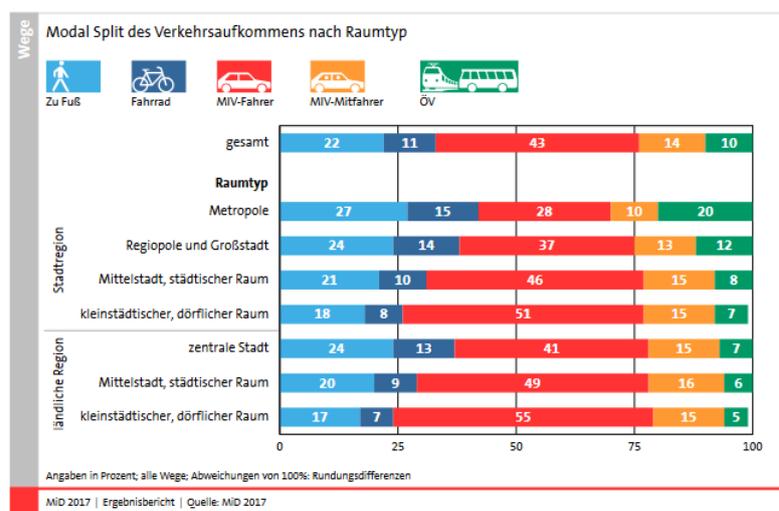


Abbildung 1: Modal Split des Verkehrsaufkommens nach Raumtyp [31]

Der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) ist im ländlichen Raum schwach nachgefragt und kaum ausgelastet. Das teils fehlende attraktive ÖPNV-Angebot hat eine hohe Nutzung des motorisierten Individualverkehrs (MIV), vor allem in ländlichen Gebieten, zur Folge. Viele Regionalverbände und Forschungsinstitute haben sich im Zuge dessen zum Ziel gesetzt dieses Problem zu lösen und die Herausforderung angenommen das ÖPNV-Angebot im ländlichen Raum attraktiver zu gestalten und weiterzuentwickeln, um auch auf dem Land CO₂-Emissionen einsparen zu können. Ein neues flexibles, digitalisiertes und bedarfsorientiertes Verkehrsangebot ist dabei entstanden. Im Folgenden wird dieses System als „On-Demand Verkehr“ betitelt. In Kapitel 2.1 wird das System näher erläutert.

Bei der Einführung eines neuen flexiblen Bedarfsangebot im öffentlichen Verkehr stellt sich jedoch die Frage ab wann sich ein neues Angebotssystem für den Dienstleister lohnt, wie hoch die Auslastung ist und sein wird und welche Auswirkungen dies auf die Verkehrsmittelwahl und den Modal Split haben könnte. Zudem ist es essenziell zu wissen ab welcher Auslastung und bei welchen Kriterien einem Systemoptimum nähergekommen wird. Das bedeutet, welche Belegungsgrade erreichbar werden, ohne, dass die Angebotsqualität für den Nutzenden sinkt. Ist ein On-Demand System leistungsfähig genug, um den ÖPNV im ländlichen Raum effizient zu unterstützen und zu ergänzen? Welche Voraussetzungen gibt es? Wie unterscheiden sich diese Indikatoren untereinander, wenn man sie auf unterschiedlichen Untersuchungsräumen betrachtet?

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Systemgrenzen und Leistungsfähigkeit eines On-Demand Verkehrssystems durch Sensitivitätsanalysen bestimmter Parameter zu untersuchen und diese bei unterschiedlichen Modellregionen miteinander zu vergleichen.

1.2 Methodisches Vorgehen

Um die Grenzen eines On-Demand Verkehrssystems in dieser Arbeit zu beschreiben, wird wie folgt vorgegangen:

Nach einer, in diesem Kapitel anschließenden, Definition bestimmter Leitfragen, werden zunächst theoretische Grundlagen dargelegt, welche zum Verständnis der weiteren Ausarbeitung beitragen werden. Dazu zählt eine erste Einordnung des On-Demand Verkehr, die Einführung in die Methode der mikroskopischen Verkehrssimulation und die grobe Beschreibung der Modellregion.

Folgend wird das System des On-Demand Verkehrs detaillierter abgesteckt und mit Best Practice Beispielen ergänzt. Auch aktuelle Herausforderungen solcher Systeme werden erläutert. Für die Analyse eines On-Demand Verkehrsangebots sind Key-Performance-Indikatoren zu erarbeiten, welche während der Simulation und Auswertung eine große Rolle spielen werden. Diese werden ebenfalls in Kapitel 3 definiert.

Anschließend folgt die Auswahl der Modellregionen bzw. Untersuchungsräume. Während diese in SUMO modelliert werden, sind verschiedene Parameter aufzulisten, welche in den Simulationsszenarien für die Sensitivitätsanalysen verändert werden.

Ergebnisse werden in einer Exceltabelle strukturiert und in Kapitel 5 hinsichtlich der vorher festgelegten KPI und der Parameter Sensitivitäten analysiert. Ein Vergleich der Parametersensitivitäten der verschiedenen Modellregionen bildet den Abschluss des Kapitels.

Im Schlussteil werden die untersuchten Sensitivitäten und Grenzen eines On-Demand Systems zusammengefasst und auf bedeutsame, auffällige Ergebnisse, Probleme und Leitfragen eingegangen. Die Arbeit endet mit einem Ausblick auf zukünftige Entwicklungen und Potenziale des Verkehrs-, Mobilitäts- und On-Demand Systems.

1.3 Leitfragen

Folgende Thesen und Leitfragen unterstützen dabei die Thematik in einzelne Themen zu gliedern:

Das untenstehende Schaubild zeigt die komplexen Verbindungen zwischen den einzelnen Parametern und Indikatoren der Thematik. Während im Kern (blaue Umrandung) die Indikatoren für die Leistungsfähigkeit stehen, haben die Parameter, wie Nachfrage und die verschiedenen Möglichkeiten des Angebotskonzeptes, Einfluss auf diese. Die Leitfragen können anhand dieses Schaubildes erläutert werden:

- Welche KPI sind für eine Bewertung eines On-Demand Systems zu definieren?
- Welche KPI haben Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines On-Demand Systems?
Wie hoch kann diese steigen?
- Wie wird die Sensitivität zwischen Nachfrage und Dienstleistungskonzept deutlich?
- Wie verändern sich die Sensitivitäten der Modellregionen untereinander?

- Unter welcher Bedingung können Zielkonflikte eines On-Demand Systems vereint werden?

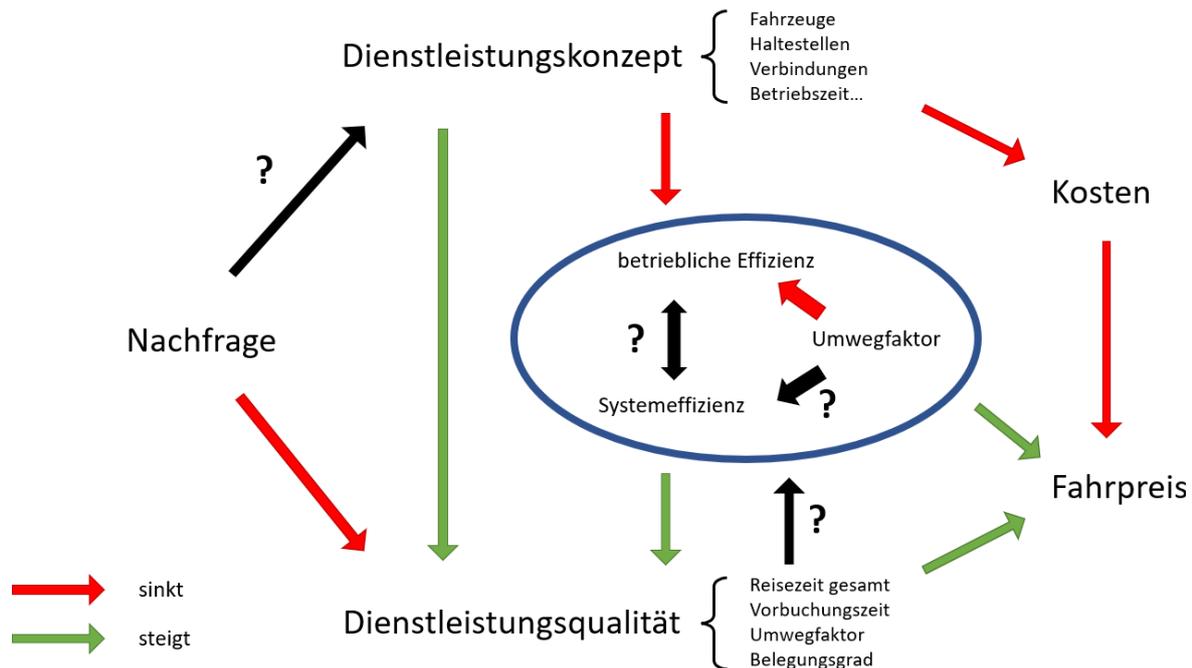


Abbildung 2: Zielkonflikte und deren Zusammenhänge, eigene Darstellung

Anmerkung: Das Schaubild ist in Großformat im Anhang aufgeführt.

Im konzeptionellen Schaubild wird zwischen Nutzer und Betreiberseite unterschieden. So stehen das Dienstleistungskonzept und die Kosten auf der „Betreiberseite“, während die Dienstleistungsqualität und der Fahrpreis Einfluss auf den Nutzenden haben.

Welchen Einfluss die Indikatoren und Parameter auf die Dienstleistungsqualität und das Dienstleistungskonzept von On-Demand Verkehren haben, wird im späteren Verlauf der Ausarbeitung erläutert (Kapitel 3.4 und 5).

1.4 Grundlegende Begriffe und Abgrenzung

Im Folgenden werden wichtige Begriffe, welchen im Laufe der Ausarbeitung benutzt werden, definiert, um eine grundlegende Wissens Ebene für den Leser zu schaffen.

Der Begriff „Öffentlicher Personennahverkehr“, abgekürzt mit „ÖPNV“ wurde bereits im ersten Kapitel aufgegriffen. Laut dem §2 im Regionalisierungsgesetz (RegG) werden dem ÖPNV alle „[...] Beförderungen von Personen mit Verkehrsmitteln im Linienverkehr“ zugesprochen, „[...] die überwiegend dazu bestimmt sind, die Verkehrsnachfrage im Stadt-, Vorort- oder Regionalverkehr zu befriedigen. Das ist im Zweifel der Fall, wenn in der Mehrzahl

der Beförderungsfälle eines Verkehrsmittels die gesamte Reiseweite 50 Kilometer oder die gesamte Reisezeit eine Stunde nicht übersteigt“ [2].

Der On-Demand Verkehr als Begriff wird in Kapitel 2.1 und 3 näher beschrieben, da dieser einer genaueren Erläuterung bedarf und ein grundlegendes Element dieser Arbeit ist.

Key-Performance-Indikatoren (KPI) sind aussagekräftige Kennzahlen. Die Übersetzung bedeutet Schlüsselkennzahl(en), Leistungskennzahl oder Leistungsindikator. Diese Kennzahlen definieren Aktivitäten, Zielvorgaben oder Erfolge für verschiedenen Prozesse in Unternehmen. Jede Projekt- und Organisationseinheit interessiert sich für unterschiedliche KPI. Während sich das interne Rechnungswesen zum Beispiel für Ergebniskennzahlen oder Liquiditäts- oder Cashflow- Kennzahlen interessiert, legt das Marketing seinen Wert auf Kundenbeziehungskennzahlen oder Kommunikationskennzahlen (vgl. [3]). „Anhand des Key Performance Indicators wird sichtbar, ob und in welchem Umfang ein vorgegebenes Ziel erreicht wird oder ein Unternehmensbereich beziehungsweise ein System seinen Zweck erfüllt. [...] Damit es sich bei einem Key Performance Indicator um eine tatsächlich aussagekräftige und für den Erfolg einer Aktivität entscheidende Leistungskennzahl und nicht um eine x-beliebige Kennzahl handelt, sind die sogenannten SMART-Kriterien zu erfüllen. SMART gibt folgende Merkmale für einen Key Performance Indicator vor:

- S-specific (spezifisch)
- M-easurable (messbar)
- A-chievable (erreichbar)
- R-esult-oriented (ergebnisorientiert)
- T-ime-bound (zeitlich gebunden) [4]“

Im Laufe der Ausarbeitung werden immer wieder Key-Performance-Indikatoren erwähnt und verwendet. Welche KPI für die Analyse der On-Demand Verkehre von Bedeutung sind, wird in Kapitel 3.4 erläutert.

Für verschiedenen Teilgrößen von Verkehrsmodi im Verkehrswesen lassen sich Vergleichswerte angeben. Diese Vergleichswerte werden herangezogen, um Ziele im On-Demand Verkehr zu verdeutlichen oder eine Vergleichbarkeit dieser mit anderen Verkehrsmodi darzustellen.

Folgende Werte werden angenommen und stammen aus dem Jahr 2020:

- Pkw-Verkehr Leerkilometeranteil 0,0
- Pkw- Verkehr Umwegfaktor minimal über 1,0 (durch Parkplatzsuche)
- Pkw-Verkehr zeitgleiche Buchungen: knapp über 1,0
- Pkw-Verkehr durchschn. Fahrzeugbesetzung: 1,36 (MiD, 2018)
- Taxiverkehr Umwegfaktor: 1,0
- Taxiverkehr zeitgleiche Buchungen: 1,0

Die Vergleichswerte mit dem ÖPNV sind schwierig zu erheben. Durch das gemeinsame Zurücklegen von Wegen durch mehrere Personen in einem Fahrzeug fehlt der Bezug zu individuellen Umwegen und Buchungen (vgl. [5]).

Die Leistungsfähigkeit ist ein wichtiger Indikator für ein Teil- oder Gesamtsystem. Sie wird immer zeitlich auf einen entsprechenden Untersuchungsraum oder Angebot (Rahmen) bezogen. Im Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) ist die Leistungsfähigkeit für eine (Einrichtungs-)Fahrbahn wie folgt definiert. Sie ist „[die größte Anzahl von Verkehrselementen eines Stromes, die je Zeiteinheit bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen den für die Funktionsfähigkeiten der Anlage entscheidenden Querschnitt passieren kann. [6]“ Der jeweilige Querschnitt in einem Strom ist der Untersuchungsraum bzw. der abgesteckte Rahmen. Im On-Demand Verkehr ist die Leistungsfähigkeit also die erbrachte Leistung (Personen von A nach B oder gebuchte Personenkilometer pro Zeiteinheit) in einem bestimmten Untersuchungsraum in einer festgelegten Zeit. Diese wird durch die Simulationen im Späteren ermittelt.

2 Theoretische Grundlagen

Das zweite Kapitel behandelt die theoretischen Grundlagen zu den Hauptbestandteilen der Masterarbeit. Im ersten Abschnitt wird das On-Demand Verkehrssystem erläutert, bevor es in Kapitel 3 anhand von Best Practice Beispielen und aktuellen Herausforderungen beschrieben wird. Im zweiten Abschnitt des zweiten Kapitels folgt die Vorstellung der Simulationssoftware SUMO, welche die Sensitivitätsanalysen durchführen wird. Anschließend wird die Modellregion mit Verkehrsträgern, Zuständigkeiten und Besonderheiten vorgestellt.

2.1 Einordnung und Entwicklung im On-Demand Verkehr

On-Demand bedeutet übersetzt „auf Bestellung“. Ein On-Demand Verkehrssystem fundiert also auf bedarfsorientierten Nutzeranfragen. Als Bedarfsverkehr im ÖPNV soll der On-Demand Verkehr „[...] den Linienverkehr in Räumen und zu Zeiten schwacher Verkehrsnachfrage [ergänzen]“ [7]. On-Demand Verkehre sind dabei moderne, App-basierte Angebote, welche einen speziellen Algorithmus haben, um Fahrtanfragen und -wünsche zu bündeln (vgl. [7]). Dadurch bringen On-Demand Verkehre mehr Flexibilität, Individualität und den Vorteil der Digitalisierung für den Benutzer in ein getaktetes, starres ÖPNV-Netz und ergänzen dieses. Aus diesem Grund entsteht der Vorteil, dass die Nutzer spontan einen Fahrtwunsch anfragen können und mit einer relativ geringen Wartezeit von Haustür zu Haustür (oder ein sich in der Nähe befindlicher Ort) transportiert werden. Folgende Abbildung ordnet den On-Demand Verkehr ein.

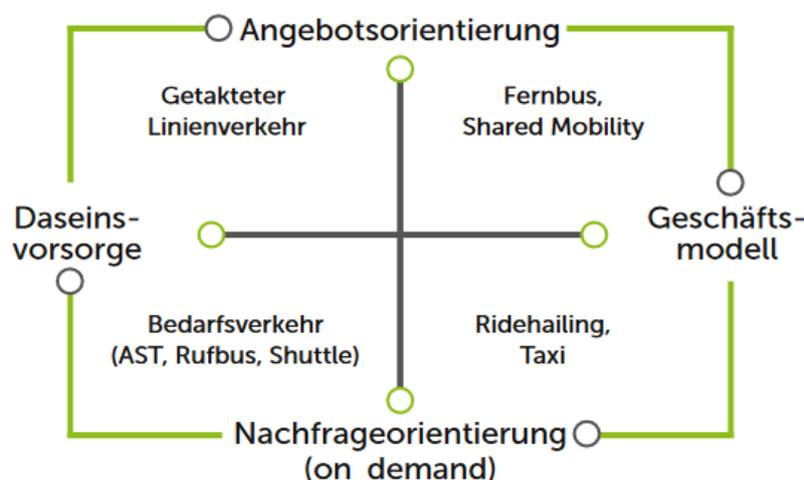


Abbildung 3: Einordnung On-Demand Verkehre

(S.7 [34])

On-Demand Verkehre werden dabei als Teil der Daseinsvorsorge, aber dennoch immer nachfrageorientiert für den Nutzenden verstanden (Abbildung 3: Einordnung On-Demand Verkehre). Spätestens wenn eine Automatisierung der Fahrzeuge erfolgt, wird die Einordnung jedoch verändert, da eine gewisse Angebotsorientierung und der Gedanke eines wirtschaftlichen Geschäftsmodells hinzukommen.

Ein System besteht hauptsächlich aus zwei Elementen. Der **Dispositionsalgorithmus** wird von Technologiefirmen entwickelt und mit einem **Regionalverband**, welcher für ein Verbandsgebiet zuständig ist, zu einem Verkehrsangebot kombiniert.

Das Angebot des On-Demand Verkehrs in seinen Ursprungsformen als Anrufsammeltaxi (AST) und Anruflinientaxi (ALT) existiert in diesem Format seit mehreren Jahrzehnten. Durch den technologischen Fortschritt und steigendem Know-How entwickelt sich der On-Demand Verkehr jedoch weiter. Algorithmen zur Bündelung des Verkehrs verbessern sich, die Forschung treibt Untersuchungen voran und die Bereitschaft der Menschen, ein flexibles Bedarfsangebot zu nutzen steigt ebenfalls. In Zukunft soll der öffentliche Verkehr durch autonome Fahrzeuge ressourcenschonend unterstützt werden und die Infrastruktur durch Bündelungsverkehre und moderne Technologien, wie Car2X Kommunikation, entlastet werden.

2.2 SUMO

Mit Hilfe der mikroskopischen Verkehrssimulationssoftware SUMO (**S**imulation of **U**rban **M**obility) können intermodale Reiseketten, Verkehrssysteme, sowie weitere realistische Verkehrsräume abgebildet und simuliert werden. SUMO ist dabei eine open-source basierte, das heißt frei zugängliche, Simulationssoftware, welche seit 2001 insbesondere vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) weiterentwickelt wird. Seit 2017 gehört SUMO zur Eclipse Foundation und wird von verschiedenen Partnern aus der Industrie und Forschung, welche der OpenMobility Working Group angehören, unterstützt. Dazu gehören Bosch, Vector, sowie das DLR oder Fraunhofer Institut. SUMO basiert auf den Programmiersprachen C++ und Python (vgl. [8]).

Weltweit wird auf diese Simulationssoftware zurückgegriffen, um komplexe Verkehrssysteme darzustellen und zu simulieren. Das Ziel in der Anwendung von SUMO ist es, die ver-

schiedensten Mobilitätsangebote einer Stadt darzustellen und diese auch miteinander verbinden zu können. Hierbei können individuelle Objekte und Bewegungsabläufe einzeln simuliert und ausgewertet werden.

Die Verkehrssimulationssoftware bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten. Mit Modulen, wie „Verkehrsmanagement“, „Implementierung multimodaler Reiserouten“ oder bis zur „Variabilität der Plattformen und Netzwerkgrößen“, kann gearbeitet und experimentiert werden (Abbildung 4: Features von SUMO).

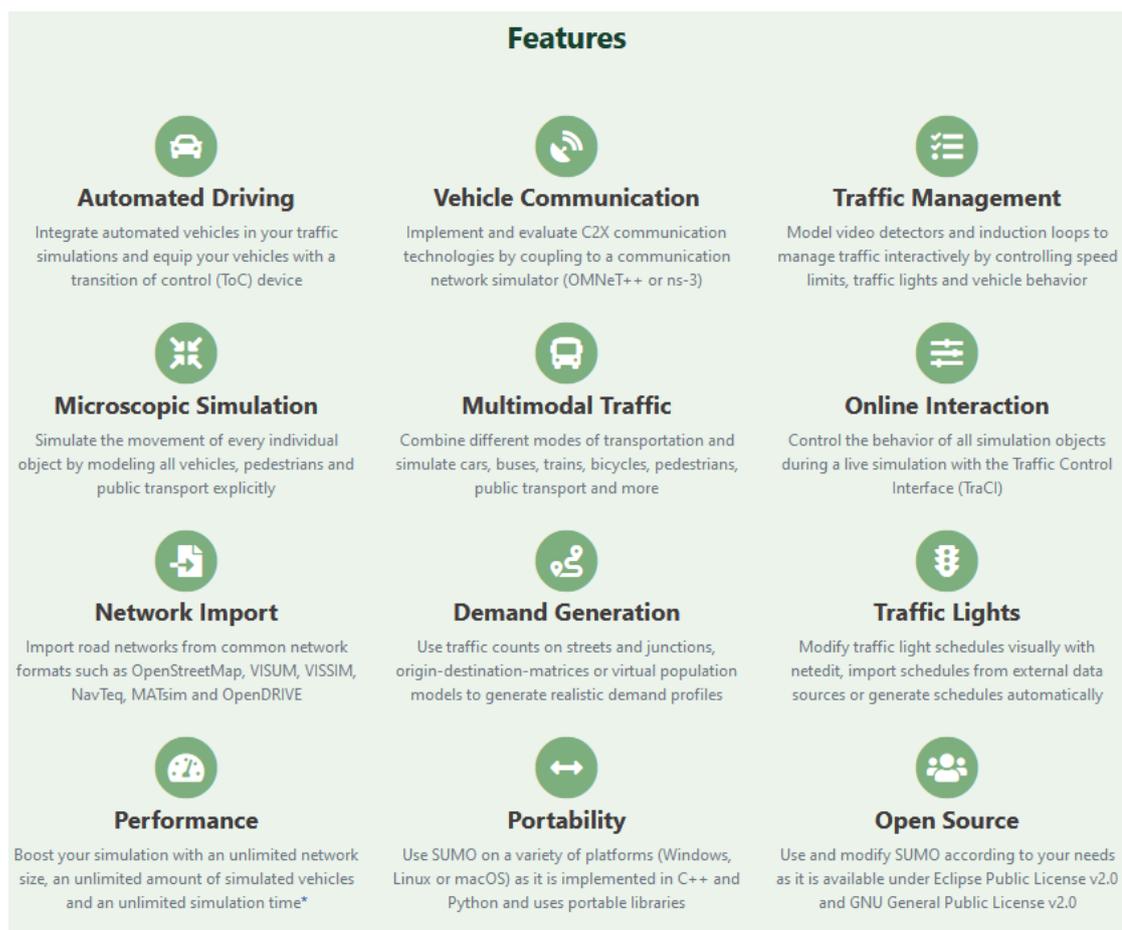


Abbildung 4: Features von SUMO [8]

Die wichtigsten Funktionen zur Durchführung der Sensitivitätsanalysen des On-Demand Verkehrs sind dabei die multimodalen Reiseketten. Bei einem Fahrtwunsch mit einem Fahrzeug des On-Demand Angebots startet der Nutzende von einer festgelegten, in der Nähe befindlichen, virtuellen oder realen Haltestelle. Von der Haustür, dem Park oder einem anderen Startpunkt bis zur Haltestelle legt der Nutzende eine kleine Entfernung zu Fuß zurück. Ist das Fahrzeug angekommen, fährt er bis zu einer gewünschten Zielhaltestelle, bevor er dort einen erneuten Gang zum letztendlichen Zielort zurücklegen muss. Diese multimodale Reise aus Fußweg, Fahrt und erneutem Fußweg kann in SUMO dargestellt und ausgewertet

werden. Zudem ist die „Online Interaktion“, also das Beeinflussen durch den Algorithmus während die Simulation läuft, essenziell, denn die sich ständig ändernden und hinzukommenden Fahrtwünsche und die Fähigkeit diese zu bündeln macht einen On-Demand Service aus. Nur dadurch werden zum Beispiel Kilometer im Vergleich zum motorisierten Individualverkehr und damit CO₂ eingespart.

Folgend wird SUMO in den nächsten Schritten dieser Arbeit genutzt, um Untersuchungsräume und multimodale Reiseketten eines On-Demand Verkehrs darzustellen und verschiedene Simulationsdurchläufe mit veränderten Parametern durchzuführen und zu analysieren.

2.3 Die Modellregion Großraum Braunschweig

Die Modellregionen, welche zur Analyse von On-Demand Verkehren herangezogen werden, liegen im Großraum Braunschweig. Dabei orientieren diese sich an den Projektgebieten der Flexo-On-Demand-Verkehre des Regionalverbandes Braunschweig. Der Großraum Braunschweig liegt im südöstlichen Niedersachsen, unmittelbar am norddeutschen Mittelgebirge Harz im Landkreis Goslar angrenzend. Des Weiteren gehören die Landkreise Wolfenbüttel, Helmstedt, Gifhorn und Peine sowie die kreisfreien Städte Braunschweig, Salzgitter und Wolfsburg zum Gebiet des Großraum Braunschweig (Abbildung 5: Karte des Großraum Braunschweig).



Abbildung 5: Karte des Großraum Braunschweig [9]

„Die Landkreise untergliedern sich in 24 Einheits- und 15 Samtgemeinden, die Samtgemeinden wiederum in 86 Mitgliedsgemeinden (Stand Nov. 2021)“ [9]. Das komplette Gebiet hat eine Fläche von 5.090 Quadratkilometern und gibt circa 1,13 Millionen Menschen eine Heimat (vgl. [9]). In diesen Regionen sind auch die Flexo-Gebiete einzuordnen.

Der zuständige Aufgabenträger für verkehrsplanerische Dienstleistungen ist der Regionalverband Braunschweig. Er hat in seinem Verbandsgebiet zwei Aufgabenbereiche:

- Der Regionalverband ist Träger der Regionalplanung und untere Landesplanungsbehörde nach dem niedersächsischen Gesetz über Raumordnung und Landesplanung
- Er ist Aufgabenträger für den öffentlichen Schienenpersonennachverkehr (SPNV) und Straßenverkehr (ÖPNV)

Der RGB ist dafür zuständig „[...] übergeordnete, überörtliche und zusammenfassende Pläne oder Programme aufzustellen und fortzuschreiben sowie alle raumbedeutsamen Planungen aufeinander abzustimmen. [10]“

Des Weiteren ist es eine wesentliche Aufgabe einen Nahverkehrsplan aufzustellen. Dieser ist fünf Jahre gültig und setzt den Rahmen für die Entwicklung des öffentlichen Nahverkehrs und das Bedienangebot der Region. Seit 2017 kann der RGB weitere Aufgaben wie die Erstellung regionaler Tourismuskonzepte, Beratung von Kommunen bei Planung, Erschließung oder Vermarktung von Gewerbeflächen oder Hochwasserschutzaufgaben, etc., wahrnehmen (vgl. [10]).

Im Verbandsgebiet der RGB sind seit Ende 2021 On-Demand Verkehre eingesetzt. Im folgenden Kapitel werden On-Demand Verkehre definiert und anschließend an Best Practice Beispielen, wie „Flexo“ in der Region Großraum Braunschweig, erläutert.

3 On-Demand Verkehre

Der Ablauf eines On-Demand Verkehrs aus Nutzersicht ist wie folgt:

Im ersten Schritt bucht der Nutzende eine Fahratanfrage per Telefon, in einer App oder auf einer Internetseite. Dort werden eine Starthaltestelle, eine gewünschte Abfahrtszeit und die Zielhaltestelle der Fahrt abgefragt. Während der anschließenden Fahrt des Disponenten zum und mit dem Kunden, wird durch eine dynamische Routenführung eine effiziente und optimale Route entwickelt. Im dritten und vierten Schritt werden „[...] andere Fahrgäste, die ein ähnliches Ziel haben, [...] entlang der Strecke mitgenommen und abgesetzt. Durch intelligente Routenführung können Fahrgäste [(oder Güter)], die in die gleiche Richtung fahren, in ein und demselben Fahrzeug gebündelt werden [...]“ [11]. Diese Eigenschaft wird als „Pooling“ bezeichnet. Beim Pooling sorgt ein Algorithmus dafür, dass die entstehenden Umwege möglichst kurz bleiben, um die Fahrtzeit für die Gäste gering zu halten. Der entstandene Umwegfaktor ist ein wichtiger Key-Performance-Indikator für die betriebliche Effizienz eines On-Demand Systems. Schlussendlich folgt das Absetzen des Fahrgastes oder der Fahrgäste am gewünschten Zielort. Der Zielort ist eine Haltestelle oder ein, durch den Betreiber definierter, Haltepunkt. Der Ablauf ist folglich schematisch dargestellt.



Abbildung 6: Klassischer Ablauf eines On-Demand Angebots [11]

Jedes On-Demand System hat einen ähnlichen Ablauf. Von Dispositionsalgorithmus bis zur Ausstattung der Fahrzeuge können jedoch Unterschiede auftreten. Das Ziel eines On-Demand Verkehrs ist jedoch immer dasselbe: Durch die flexible Bedienform und damit verbundene dynamische Routenführung soll die Angebotsqualität im ÖPNV erhöht und eine attraktive Alternative zum Linienverkehr geboten werden. Gleichzeitig sollen Betriebskosten gesenkt werden (vgl. [11]).

3.1 Planung und Förderung

Grundlegend spielt die Akzeptanz der Bevölkerung und die Bereitschaft flexible Bedienformen zu nutzen bei der Einführung eines On-Demand Verkehrs eine große Rolle.

Das Schaubild verdeutlicht die Komplexität der Einführung einer flexiblen Bedienform in ländlichen Regionen.

Schematische Darstellung des Auswahlrasters

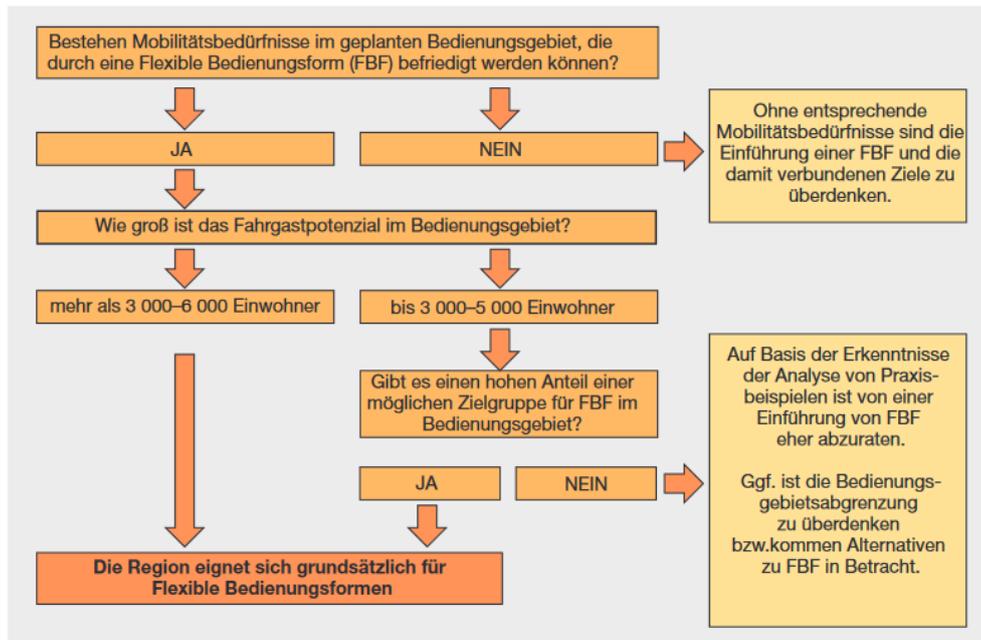


Abbildung 7: Vereinfachte schematische Darstellung eines Auswahlrasters zur Planung flexibler Bedienformen [12]

Die Anzahl an bedeutenden Infrastruktureinrichtungen in der Umgebung, wie Einkaufs-, Freizeit- oder Versorgungsmöglichkeiten haben eine Auswirkung auf die Mobilitätsbedürfnisse der Einwohner. Gibt es diese nicht, so haben Bewohner keinen Grund, kurze Wege zwischen Dörfern und damit flexible Bedienformen zu nutzen. Ebenso sind die spezifischen Zielgruppen in Abhängigkeit der Mobilitätsbedürfnisse zu erörtern. Junge Leute zieht es in den urbanen Raum, sind jedoch ohne Führerschein oder PKW weniger flexibel, wohingegen der Autobesitz älterer Personen durch den demografischen Wandel steigt (vgl. [12]). „Ein überdurchschnittlich hoher Anteil einer spezifischen potenziellen Nutzergruppe trägt de facto zu einer Erhöhung des Fahrgastpotenzials bei [...]“ [12]. Welche Grenzen eines On-Demand Systems durch den Einfluss der Nutzenden entstehen, wird im späteren Verlauf der Ausarbeitung deutlich.

Bei der Planung und Inbetriebnahme eines bedarfsorientierten Verkehrssystems können vom zuständigen Verkehrsverband Zuschüsse beantragt werden, um die Kosten für eine Einführung zu decken. Die Landesregierungen fördern innovative Projekte zum besseren Angebot des öffentlichen Nahverkehrs durch Förderbescheide. So stellt die Landesregierung Nordrhein-Westfalen dem Ruhrgebiet, der Städteregion Aachen, der Niederrhein Region und weiteren Kreisen bis zu 10,6 Millionen Euro zur Verfügung, um ein besseres Verkehrsangebot im Nahverkehr zu schaffen. Dazu zählt auch die Erprobung von On-Demand Systemen. Konkret werden Projekte wie „Wir-4-Mobil“ mit rund 5 Millionen Euro gefördert (vgl. [13]).

Auch das Land Niedersachsen unterstützt flexible Bedienformen. Bereits im Jahr 2017 änderte und verbesserte das Land die gesetzlichen Rahmenbedingungen zugunsten der ÖPNV-Finanzierung im Niedersächsischen Nahverkehrsgesetz (NNVG). Zudem werden zusätzlich 20 Millionen Euro pro Jahr zu Verbesserung des „ÖPNV vor Ort“, also eine Erhöhung der Finanzhilfe an ÖPNV-Aufgabenträger um 53%, fließen. Diese Fördermittel „[...] sollen insbesondere für die Entwicklung von Angeboten flexibler Bedienformen verwandt werden [...]“ [14]. Diese sind fortan auch im Niedersächsischen Nahverkehrsgesetz definiert.

Auch im Personenbeförderungsgesetz (PBefG) werden die Rechtsvorschriften für On-Demand Verkehre neu aufgenommen und überarbeitet (vgl. [15]).

Der Bund trägt unter anderem durch die Förderung von zwölf Modellprojekten zur Stärkung des ÖPNVs bei. Im Rahmen der Förderrichtlinie „Modellprojekte zur Stärkung des ÖPNV“ werden bis 2024 bis zu 250 Millionen Euro für Projekte zur Reduzierung der CO₂-Emissionen bereitgestellt. In den Plänen der zwölf Projekte werden vor allem die Einführung von On-Demand Verkehren, die Schaffung von Mobilitätsstationen, Förderung der Barrierefreiheit und vieles mehr fokussiert (vgl. [16]). Eine Übersichtskarte und die Liste der Förderprogramme bzw. Modellprojekte werden im Anhang aufgeführt.

Diese Förderprogramme machen es den Regionalverbänden, Kommunen und Forschungsinstituten leichter innovative, neue „Mobilitätsformen“ zu erforschen, zu entwickeln und in Testphasen umzusetzen. Im Endeffekt lässt sich erkennen, dass die Förderprogramme des Bundes und der Länder in den letzten Jahren umfangreicher in ihrer Förderung und wichtiger in ihrer Umsetzung und Verbreitung geworden sind.

Wie wichtig die Planung eines On-Demand Systems ist und welche Parameter und Indikatoren dabei eine Rolle spielen, wird im Laufe der Arbeit untersucht.

3.2 Best Practice Beispiele

Anschließend werden mehrere On-Demand Verkehrssysteme beschrieben. Die beiden flexiblen Bedienformen wurden erfolgreich in der jeweiligen Region eingeführt. Während HubChain im Raum Osnabrück fährt, ist flexo ein Braunschweiger On-Demand Service, an welchem sich auch die Sensitivitätsanalysen im weiteren Verlauf dieser Arbeit orientieren. Weiterhin werden die Herausforderungen und Potenziale von Ridepooling Diensten erläutert und damit zusammenhängend die wichtigen KPI zur Analyse derer dargelegt.

3.2.1 Flexo

Flexo ist ein voll in das ÖPNV-System integrierte On-Demand Angebot des Regionalverbandes Braunschweig. Das flexo- System ergänzt dann den ÖPNV, wenn zur nachgefragten Zeit kein Nahverkehrsangebot besteht. Durch die flexible Bedienform wird eine neue Mobilitätskette geschaffen, welche entweder zu dem gewünschten Zielort oder zur nächsten Haltestelle von Bus und Bahn führt. Eine komplette flexo- Tour wird erst dann durchgeführt, wenn es keine anderen Fahrten gibt, mit denen der Fahrtwunsch gebündelt werden kann. Der Service „flexo“ kann aktuell per Telefon gebucht werden. Um den flexo- Dienst schnell und einfach zu erreichen, wurden über die aktuellen Bushaltestellen im jeweiligen Gebiet hinaus mehr als 200 neue Halteorte geschaffen. Diese heißen „flexo- Stops“ und sind durch zusätzliche lila Schilder im Verbandsgebiet gekennzeichnet (Abbildung 8: Ablauf einer Flexo-Buchung).



Abbildung 8: Ablauf einer Flexo-Buchung [17]

Flexo startet in elf Projektgebieten im Großraum Braunschweig:

- Wahrenholz/Wesendorf
- Cremlingen/Schandelah
- Hoheneggelsen/Baddeckenstedt
- Seesen
- Salzgitter-Bad
- Salzgitter-Thiede
- Lehre
- Algermissen/Hohenhameln

Weitere Gebiete, wie das Stadtgebiet Wolfsburg, sind in Planung.

Die Tickets und Ticketpreise für die Fahrt orientieren sich an den Tarifpreisen des Verkehrsverbund Region Braunschweig (VRB). Die flexo- Fahrzeuge sind als Kleinbusse mit bis zu 8 Sitzplätzen ausgestattet. Sie sind barrierefrei und eignen sich auch für die Mitnahme von Tieren und Gepäck (vgl. [17]).

Das flexo- System funktioniert wie ein gewöhnliches On-Demand System. „Eine Software bündelt im Hintergrund Fahrtwünsche und erstellt auf dieser Basis individuelle Fahrtrou- ten. Das bedeutet, dass es keine starren Abfahrtszeiten für flexo gibt, sondern die nächst- mögliche Fahrt nach Fahrtwunsch angezeigt wird. Dabei achtet die Software auch darauf, dass ein Parallelverkehr mit Linienbussen ausgeschlossen wird und verweist auf das vor- handene Busangebot [17]“.

3.2.2 HUBCHAIN

Das HUB CHAIN-Projekt ist ein Forschungsprojekt zur Bedarfsanalyse der Nutzer in Bezug auf innovative Mobilitätslösungen. Der Schwerpunkt liegt auf dem öffentlichen Verkehr im ländlichen und suburbanen Raum. Anhand durchgeführter Analysen wird ein Modell für einen Mobilitätsdienst erstellt. Die Aufgabe des Projektes ist die Verknüpfung von On-De- mand Verkehr mit Taktverkehren. Angesiedelt ist HUB CHAIN in Osnabrück und dem Elde- Quellgebiet. Kunden können mit Hilfe einer Mobilitätsplattform Fahrtwünsche aufgeben und bedarfsgerecht in das Stadtzentrum gelangen. Dabei werden vor allem im Elde-Quell- gebiet die Fahrzeugrouten mit dem ÖPNV-Linienverkehr verknüpft.

Das komplette HUB CHAIN Projekt basiert auf autonomen Elektrofahrzeugen und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie vom Technologieprogramm „IKT für Elektromobilität“ mit verschiedenen Partnern aus Forschung (DLR), Consulting (Dornier) und Mobilitätsdienstleistung (KOMOB) gefördert (abgebildet auf Abbildung 9: HUB CHAIN Fahrzeug, Collage (S. 13,27)). Zwischen Dezember 2019 und März 2020 wurde ein autonomes Fahrzeug als Zubringer zum Buslinienverkehr getestet. Durch die Corona-Krise wurde der Start einer weiteren HUB CHAIN-Strecke in Bad Essen verschoben (vgl. [18]).



Abbildung 9: HUB CHAIN Fahrzeug, Collage (S. 13,27 [34])

HUB CHAIN wurde ebenso wie flexo in das vorhandene Ticket- und Buchungssystem des Verkehrsverbundes vor Ort integriert.

Durch die Learnings aus der ständig weitergehenden Studie können das Konzept weiterentwickelt und Rückschlüsse für andere On-Demand Systeme gezogen werden.

3.2.3 On-Demand in Europa: IOKI

In England hat nun eine Trendwende begonnen. In einer neuen nationalen Busstrategie möchte das „Department for Transport“ den öffentlichen Nahverkehr verändern. Die Privatisierung der Busunternehmen hatte eine Halbierung der Fahrgäste im öffentlichen Verkehr außerhalb Londons zur Folge. Durch das Dokument „Bus Back Better“ von 2021 sollen nationale „null-Emissionen“ Ziele, auch zur wirtschaftlichen Erholung nach der Corona Pandemie, erreicht werden (vgl. [19]). Gleichzeitig wurde 2020, ein Jahr zuvor, eine Kooperation von Arriva UK, Teil der Arriva Gruppe, ein in der Personenbeförderung führender Anbieter Europas, mit einem Geschäftszweig der Deutschen Bahn für intelligente On-Demand-Mobilität (ioki) beschlossen. Durch einen Rahmenvertrag wurde der Grundstein für

eine europaweite Zusammenarbeit geschlossen. Dabei sollen die nachhaltigen und klimafreundlichen Verkehrsmöglichkeiten in England verbessert werden.

Ein Auftaktprojekt in Watford ermöglicht es Fahrgästen mit Hilfe der Smartphone App „ArrivaClick“ mit drei barrierefreien Kleinbussen nach Bedarf flexibel von A nach B zu gelangen. Das Shuttle Konzept ist dabei einfacher und kostengünstiger als der öffentliche Nahverkehr 30 Kilometer nördlich von London. Dabei fungiert Ioki als Technologiepartner für vier Jahre. Vor allem die in den Spitzenstunden stark frequentierte Strecken zwischen den Bahnhöfen in Watford und East London sowie die Strecke zwischen dem Hauptbahnhof und Knotenpunkten, wie dem Stadtzentrum und den Touristenattraktionen, werden in den Fokus gesetzt (vgl. [20]).

Weitere On-Demand Dienste sind MobiShuttle im Raum Dresden oder Clevershuttle als Pionier in Deutschland. Es wird deutlich, wie unterschiedlich die Anwendung eines On-Demand Verkehrsangebots interpretiert und durchgeführt werden kann. Während der eine Anbieter noch in der frühen Entwicklungsphase ist, führt der andere bereits Analysen und Optimierungen durch. Dabei stehen die lokalen Interessen der Bevölkerung und die infrastrukturellen Gegebenheiten im Vordergrund. Zudem ist die Frage nach der Autonomiestufe eine Entscheidende, denn von ihr hängt ab, wie umfangreich das Angebot umgesetzt werden kann.

3.3 Potenziale, Probleme und Herausforderungen

Die Chancen und Risiken eines On-Demand (hier Ridepooling) Konzeptes sind verschieden. Neben den schon zuvor erwähnten Potenzialen, wie die flexible „Tür-zu-Tür Bedienung“ und die Ergänzung zum ÖPNV in nachfrageschwachen Regionen, hat eine flexible Bedienform weitere Vorteile. Vor allem soll ein höherer Besetzungsgrad (Auslastung, betriebliche Effizienz) des Fahrzeugs als beim ÖPNV erlangt werden. Damit geht einher, dass die Anzahl an PKW auf der Straße reduziert und somit Emissionen eingespart werden. Für Nutzende ist es somit eine attraktive, kostengünstige Alternative zum PKW (erhöhte Spritpreise und Kfz-Steuer) oder Nahverkehr mit Bus und Bahn (voll, große Umwege, weniger flexibel).

Allerdings bringt ein Ridepooling- Konzept auch Probleme mit sich.

Durch Leerfahrten zwischen den Fahrtbuchungen, vor allem im ländlichen Raum, steigen die Leerfahrtskilometer an. Diese haben wiederum Einfluss auf die Effizienz des Systems. Des Weiteren muss in nachfrageschwachen Regionen mit einem niedrigeren Besetzungsgrad, als in urbanen Gebieten gerechnet werden. Hier wird auch ein wichtiger **Zielkonflikt** deutlich: Eine hohe Pooling Rate wird nur durch viele, gleichzeitige Fahrtanfragen erreicht (vgl. S.5 [21]). Eine flexible, kurzfristige Verfügbarkeit, die ein On-Demand System garantiert, kann jedoch zu einer geringen Pooling- Rate ab einer bestimmten Nachfrage führen. Diese Nachfrage soll in der Ausarbeitung erörtert werden.

Weitere Zielkonflikte im On-Demand Verkehr müssen bei der Analyse beachtet werden. So reduzieren sich die Reisezeiten und (Vor-)Buchungszeiten bei höherer Fahrzeuganzahl. Auch sinken die Pooling-Rate und die Anzahl der Fahrzeugkilometer, was wiederum einen Einfluss auf die Systemeffizienz hat. Auch bedeuten mehr Haltestellen einen geringeren Weg vom Startpunkt des Nutzens bis zum Abholpunkt des Fahrzeugs, aber dadurch erhöhen sich die Fahrzeugkilometer und die Wartezeit für weitere Fahrgäste an anderen Haltestellen. Die Bündelung von Fahrten hat einen Einfluss auf andere Parameter. Wird verstärkt gebündelt, steigen der Umwegfaktor und die Reisekilometer (vgl. Folie 6 [22]). Wie genau sich diese KPI entwickeln, wird in der Analyse der Simulationen erläutert.

„Die Anbieter stehen vor der Herausforderung, auf den Märkten sowohl als Wettbewerber untereinander als auch gegenüber den etablierten Unternehmen zu bestehen bzw. ihre verschiedenen Dienstleistungen (Software, Fahrzeuge) als sinnvolle Ergänzung des ÖPNV einzuführen. Die Herausforderung für die ÖPNV-Aufgabenträger und die Anbieter von On-Demand-Verkehren besteht darin, einen Evolutionsprozess für die Angebote zu initiieren, so dass die bisher unter limitierten Anforderungen, beispielsweise im Hinblick auf die angesprochene Zielgruppe oder die Tarifintegration, erprobten Verkehre dem komplexen Anforderungsprofil eines ÖPNV-Angebots gerecht werden. Zu denken ist hier beispielsweise an die Barrierefreiheit und die Anschlussgewährleistung an Bus- und Bahnlinien, die in einem festen Takt verkehren. [7]“

Folgende Tabelle listet die Chancen und Risiken auf:

Chancen von Ridepooling	Risiken von Ridepooling
<ul style="list-style-type: none"> • Ergänzung des ÖPNV in nachfrage-schwachen Zeiten und Regionen • Optimierung intermodaler Reiseketten • Tür-zu-Tür- Bedienung oder dichtes Netz virtueller Haltestellen attraktiviert den Umweltverbund insgesamt • Potenzial zur Substitution privater Pkw • Höherer Besetzungsgrad durch Bündelung von Fahrtwünschen • Geringe, attraktive Preise für Nutzende • Durch virtuelle Haltestellen werden Leerfahrten reduziert und gekürzt • Höhere Energieeffizienz ggü. MIV • Ggf, Reduktion der Pkw-Flotte und damit Flächengewinn durch Fahrzeuge und Parkplätze 	<ul style="list-style-type: none"> • Leerfahrten zwischen Buchungen, niedriger Besetzungsgrad in nachfrage-schwachen Räumen und Zeiten • Kannibalisierung des ÖPNV in nachfragestarken Räumen und Zeiten bei nicht ÖV-integrierten Angeboten • Zielkonflikt: hohe Pooling-Raten und kurzfristige Verfügbarkeit der Dienste • Höhere Kosten als aktueller ÖPNV • Nicht überall barrierefrei • Dispositionsalgorithmus als Schlüssel

Tabelle 1: Chancen und Risiken von Ridepooling; eigene Darstellung; angelehnt an [21], [23]

Es ist zunehmend „[...] schwieriger, die Verkehrsnachfrage so zu bündeln, dass ein liniengebundener ÖPNV wirtschaftlich vertretbar organisiert werden kann [...]. Der konventionelle Linienverkehr verliert demnach an Bedeutung. [12]“ Dabei ist der Dispositionsalgorithmus das entscheidende Kriterium. Dieser wird von jedem Technologieunternehmen und Regionalverband vertraulich behandelt und ist der Schlüssel für ein effektives Ridepooling Angebot.

Es wird klar, dass diese Zielkonflikte in Zusammenhang miteinander stehen und niemals vollständig gelöst werden können. Auch kommen durch den sich ständig weiter entwickelnden technologischen Fortschritt und die gesellschaftlichen und politischen Ziele weitere Konflikte hinzu. Diese Zielkonflikte müssen miteinander vereinbart werden. Mit Hilfe der folgenden Simulationen sind diese weiter zu identifizieren und miteinander zu vereinbaren.

3.3.1 Automatisierung und fehlende Technologien

Bei der Umsetzung von flexiblen Bedienformen spielt der technologische Fortschritt eine entscheidende Rolle. In Zukunft sollen flexible Bedienformen autonom fahren, um die Personalkosten gering zu halten. Durch rechtliche Hürden und die (noch) fehlenden ausgereiften Technologien ist dies noch nicht möglich.

Die Society of Automotive Engineers (**SAE**) hat für automatisierte Fahrsysteme (Automated Driving System (ADS)) sechs Automatisierungsklassen definiert:

- Stufe 0: keine Automatisierung
- Stufe 1: assistiertes Fahren
- Stufe 2: teilautomatisiertes Fahren
- Stufe 3: hochautomatisiertes Fahren
- Stufe 4: vollautomatisiertes Fahren
- Stufe 5: fahrerloses Fahren (vgl. [24])

Abbildung 10: Die fünf Stufen des automatisierten Fahrens im Überblick zeigt die verschiedenen Stufen des autonomen Fahrens:

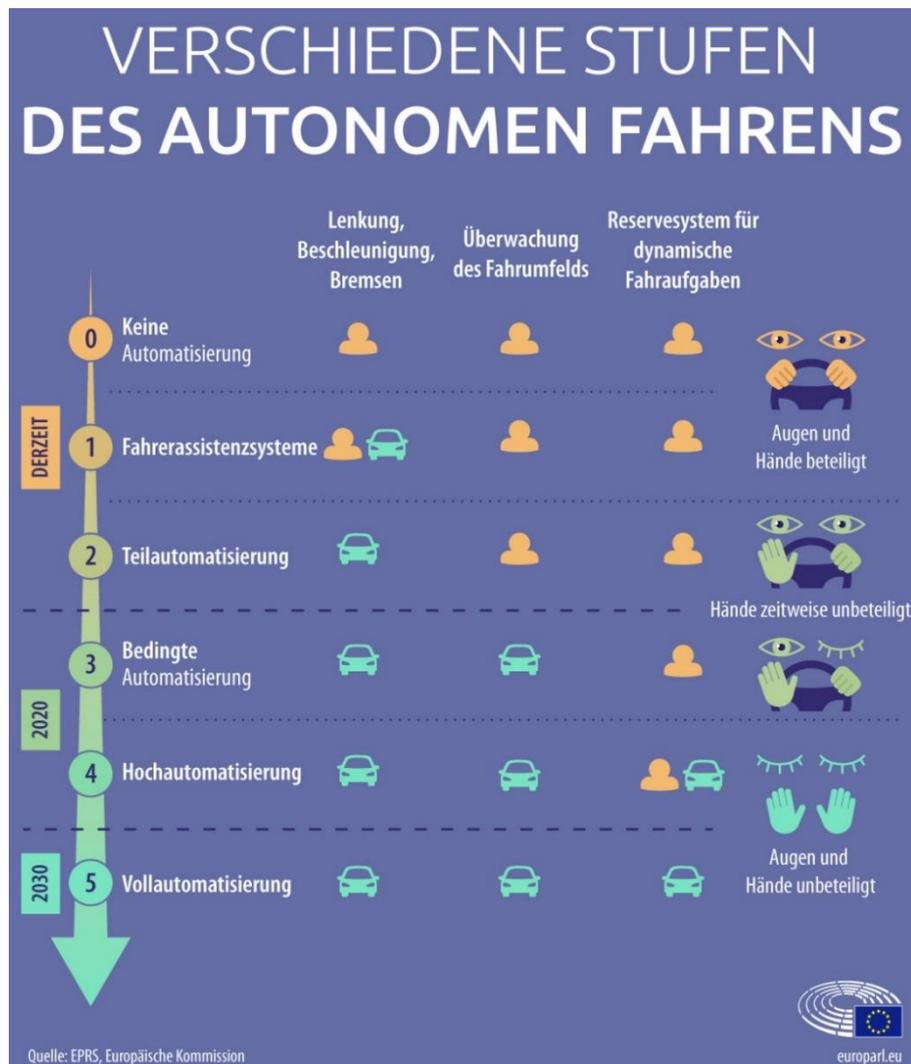


Abbildung 10: Die fünf Stufen des automatisierten Fahrens im Überblick [37]

Je nach Fahrzeug, welches für den On-Demand Verkehr verwendet wird, kann eine höhere Stufe des automatisierten Fahrens erreicht werden. Bei den neuesten Kleinbussen, wie beim flexo- Fahrzeug, sind fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme verbaut. Dementsprechend kann dies als Stufe 2 oder in seltenen Fällen als Stufe 3 des automatisierten Fahrens klassifiziert werden. In Testprojekten, wie HUB CHAIN in Osnabrück ist sogar die Stufe 5 des automatisierten Fahrens, das fahrerlose Fahren, erreicht. Dies geschieht aber auf Kosten von Parametern, wie Höchstgeschwindigkeit, Kapazität oder Reichweite, aufgrund der Elektrifizierung.

Dabei entsteht ein neuer Zielkonflikt. Durch „Umwege“ zu Ladestationen muss in den Betrieb eingegriffen werden. Autonomes Fahren bringt noch weitere Herausforderungen mit sich. Die Sicherheit sowohl für den Fahrgast als auch für die anderen Verkehrsteilnehmer muss gewährleistet werden und bei technischem Versagen muss eine Person eingreifen können. Forschungsprojekte zu autonomem Fahren laufen schon seit mehreren Jahren. Im Projekt „Movement“ des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt wurden Konzepte zur Bewältigung dieser Herausforderungen entwickelt.

Die Überlegung eines autonomen On-Demand Systems schafft dabei neue Möglichkeiten aber auch die oben genannten Herausforderungen.

Würden autonome Fahrzeuge eingesetzt werden, kann das Fahrpersonal eingespart werden und die Personalkosten reduzieren sich massiv. Dadurch kann der Betrieb kostendeckender durchgeführt werden. Das ermöglicht folglich eine Ausweitung des Angebots, wovon wiederum die Nutzenden profitieren. Autonome Fahrzeuge fahren dabei so effizient, dass weitere Kosten und Reisezeiten eingespart werden können. Generell führt eine autonome Fahrweise zu geringeren Fahrpreisen.

Auf der anderen Seite kann betont werden, dass die autonomen Fahrzeuge einen höheren Energieverbrauch vorweisen könnten. Auch bringt der technologische Fortschritt durch das autonome Fahren ein positives Sicherheitsempfinden des Fahrgastes mit sich, welches berücksichtigt werden muss. Zusammen mit der Kostenreduktion kann dies verkehrsinduzierend wirken. Das bedeutet, dass mehr Verkehr generiert wird, da das Angebot aus Nutzersicht für Aktivitäten, bei welchem der Nutzer zuvor ein anderes Verkehrsmittel benutzt hat verstärkt angenommen wird (Modal Shift). Des Weiteren ist die Geschwindigkeit eines autonomen Fahrzeugs technisch bedingt begrenzt. Das hat zur Folge, dass sich die Reisezeiten bei autonomen Fahrzeugen, trotz teilweise effizienterem Fahren, stark erhöhen.

Die Risiken und Chancen des autonomes Ridepooling sind in folgender Tabelle dargestellt:

Chancen von Ridepooling	Risiken von Ridepooling
<ul style="list-style-type: none"> • Effiziente Fahrweise durch autonome Fahrzeuge • Kostenreduktion durch Wegfall der Fahrpersonalkosten • Rentables Geschäftsmodell ermöglicht Vielzahl neuer Mobilitätsdienstleistungen • Kostendeckender Betrieb ermöglicht Angebotsausweitung als ÖPNV-Ergänzung • Flächendeckende ÖPNV-Integration von Ridepooling: „Haustüranschluss Mobilität“ bietet Verlagerungspotenzial auch im nachfrageschwachen Raum 	<ul style="list-style-type: none"> • Begrenzte Geschwindigkeit durch autonome Fahrzeuge • Stärkere Gefahr der Kannibalisierung von ÖPNV • Kostenreduktion kann verkehrsinduzierend wirken • Höheres Sicherheitsempfinden kann verkehrsinduzierend wirken • Zusätzlicher Energieverbrauch der autonomen Technik

Tabelle 2: Chancen und Risiken eines autonomen Ridepooling- Konzeptes angelehnt an [21]

3.3.2 Abhängigkeiten und Zusammenhänge der KPI

Ab wann gilt ein On-Demand Verkehr als effizient? Für Prof. Dr. Liebchen der Technischen Hochschule in Wildau wird dieses als Verhältnis von Nutzen und Aufwand verstanden. Für ein Ridepooling Konzept besteht *der Nutzen* in den zurückgelegten Personenkilometern. Zu Personenkilometern zählen die Fahrtkilometer des Fahrzeugs, bei welchen ein Fahrgast anwesend ist. *Der Aufwand* wiederum ist die Kilometeranzahl, welche das Fahrzeug insgesamt zurücklegt. So ist die betriebliche Effizienz ein Key-Performance-Indikator für die Auslastung bzw. den Belegungsgrad eines On-Demand Fahrzeugs. Folgende Formel stellt diese Überlegung dar:

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

Zu beachten ist jedoch, dass die betriebliche Effizienz besser wird, wenn der Umwegfaktor und damit die Fahrzeugkilometer steigen.

Folgend lässt sich der Nutzen eines On-Demand Systems präziser bestimmen. Durch individuelle Fahrtwünsche haben Ridepooling Systeme einen unterschiedlichen Nutzen für jeden Fahrgast. Dieser Nutzen ist differenziert zu betrachten, da beim Pooling der Fahrgast unterschiedliche Umwege in Kauf zu nehmen hat. Der Umweg bildet zusätzliche Fahrtkilometer, die aber dem Fahrgast keinen Nutzen bringen. Hier ist die Nutzengröße also die „Personenkilometer gebucht“ im Verhältnis zu der Aufwandsgröße „Fahrzeugkilometer gesamt“. Professor Liebchen nennt dies die Systemeffizienz.

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

Der Umwegfaktor, welcher bei den Nutzern individuell ist, kann mit Hilfe der gefahrenen Personenkilometer und der tatsächlich gebuchten Personenkilometer ermittelt werden.

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

Während die betriebliche Effizienz nur durch zwei Parameter definiert wird, hat die Systemeffizienz mehrere Indikatoren, welche miteinander zusammenhängen. Sowohl der Umwegfaktor, der Besetzungsgrad des Fahrzeugs, als auch der Leerkilometeranteil haben Auswirkungen auf die Systemeffizienz. Ein geringer Besetzungsgrad ist ebenso schlecht wie ein

hoher Umwegfaktor und Leerkilometeranteil (vgl. Folie 21-25 [25]). Die Beziehung der Indikatoren untereinander wird hier aufgeführt und fehlt dementsprechend in der Grafik.



Abbildung 11: Parameter der Systemeffizienz und deren Zusammenhänge [25]

Die Systemeffizienz ist hoch, wenn der Umwegfaktor für den Fahrgast gering ist. Das steht jedoch in Korrelation mit der Besetzung. Soll eine möglichst hohe Poolingrate (Besetzung) erreicht werden, steigt der Umwegfaktor zwangsmäßig. Der Leerkilometeranteil hingegen hat einen möglichst geringen Wert anzunehmen.



Abbildung 12: Indikatoren der Systemeffizienz und deren Zusammenhänge; eigene Darstellung

Es können noch weitere Abhängigkeiten und Definitionen, nicht nur auf die Strecke, sondern auch auf die Zeit rechnerisch dargestellt werden. Entscheidend sind die Schlüsse, welche daraus abgeleitet werden können:

- je höher der Umwegfaktor, desto geringer die Systemeffizienz
- je höher die mittlere Fahrzeugbesetzung, desto höher die Systemeffizienz
- je höher der Leerkilometeranteil, desto geringer die Systemeffizienz

Wenn die Systemeffizienz für den Betreiber nicht zufriedenstellend ist, ist mindestens einer der drei Faktoren dafür ausschlaggebend (vgl. [5]).

Die von Prof. Dr. Liebchen angegebenen Formeln sollen die Effizienzen eines On-Demand Verkehrssystems rechnerisch durch Zahlen belegen.

Doch die Effizienz eines Systems kann auch anders definiert werden. Dafür wird nach Einsatz und Ergebnis differenziert. Ein System kann effizient sein, wenn ein bestmögliches Ergebnis mit fixem Einsatz erreicht wird. Anders kann auch ein fixes Ziel mit möglichst wenig Einsatz als effizient betitelt werden. Diese zwei Varianten sind auch für die Einführung eines On-Demand Systems zu unterscheiden.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit sollen diese Parameter und Key-Performance-Indikatoren durch beispielhafte Simulationsstudien aufgegriffen und in Auswertungstabellen miteinander verglichen werden, um die Effizienz sowie Leistungsfähigkeit der Systeme ebenfalls in konkreten Zahlen in Abhängigkeit zueinander zu setzen. Durch die Sensitivitätsanalysen stellt sich die Frage, um welchen Wert sich die Indikatoren zueinander verändern.

3.4 Key-Performance-Indikatoren und Parameter zur Analyse

Um ein On-Demand System in SUMO zu simulieren, müssen verschiedene Parameter als Input für diese verwendet werden. Diese werden im Folgenden „Inputparameter“ genannt:

Inputparameter:

- Nachfrage pro Zeiteinheit
- Dienstleistungskonzept: Ausstattung (Kapazität und Anzahl der Fahrzeuge), Haltestellendichte, Elektrifizierung, Ladesäulenkonzept etc.
- Untersuchungsraum
- Untersuchungszeitraum
- Dispositionsalgorithmus (drt.online, greedy)

Der erste Parameter ist die Nachfrage. Die Nachfrage der On-Demand Verkehre wird durch Fahrplanfragen von Personen in einem Buchungszeitraum angegeben. Der zweite Inputparameter ist das Dienstleistungskonzept, welches vom Dienstleistungsanbieter zur Verfügung gestellt wird. Unter dem Dienstleistungskonzept werden verschiedene Eigenschaften des On-Demand Systems verstanden, welche vorher festgelegt wurden und sich nur selten verändern. Diese sind unter anderem die Ausstattung der Fahrzeuge, die Haltestellendichte oder die Anzahl der Fahrzeuge. Der Untersuchungsraum und der Untersuchungszeitraum werden am Anfang festgelegt und im Laufe der Simulationen nicht verändert. Der Dispositionsalgorithmus zum Bündeln der Buchungsanfragen verändert sich, wenn möglich, nicht.

Mit einzelnen Bestandteilen von diesem kann jedoch die Bereitschaft der Fahrzeuge zum Bündeln verändert werden.

Indikatoren für die Auswertung:

Folgende Indikatoren wurden im Laufe der Einführung und der weiteren Kapitel bereits qualitativ beschrieben:

- Vorbuchungszeit
- Umwegfaktor (durchschnittlich auf Zeit und Strecke)
- Leerkilometer
- Mittlere Fahrzeugbesetzung pro Zeiteinheit
- Belegungsgrad (betriebliche Effizienz)
- Reisezeit
- Systemeffizienz

Die Indikatoren sind eine bedeutsam, um die einzelnen Simulationen miteinander zu vergleichen und zu interpretieren.

Aus den Indikatoren lässt sich unter anderem eine Dienstleistungsqualität ableiten. Diese verändert sich zusammen mit ihnen und hat Einfluss auf die Nutzersicht. Für die Dienstleistungsqualität ist der Dienstleistungsanbieter verantwortlich. Dieser strebt eine möglichst hohe Dienstleistungsqualität an. Unterschieden werden muss dabei zwischen der erbrachten Dienstleistungsqualität und der wahrgenommenen Dienstleistungsqualität des Kunden. Dadurch steht sie im direkten Zusammenhang mit der Leistungsfähigkeit (d.h. mit den angenommenen Fahrtwünschen pro Zeiteinheit) eines On-Demand Systems.

Zusammenfassend sind folgende Zielkonflikte zu benennen:

Nachfrage		Dienstleistungsqualität
Kosten		Leistungsfähigkeit
Betriebliche Effizienz		Leistungsfähigkeit
Poolingrate		Umwegfaktor
Poolingrate		Vorbuchungszeit (Verfügbarkeit der Dienste)
Poolingrate		Angebotskonzept (Anzahl Fahrzeuge)
Sinnvolle Ergänzung des ÖPNV		keine "Kannibalisierung" des ÖPNV
Leerfahrt(anteil)		Systemeffizienz
autonome Fahrzeuge		Dienstleistungsqualität (niedrige Geschwindigkeit)

4 Modellierung und Simulation

Bei On-Demand Verkehren ist es wichtig zu wissen, ab wann sie funktionieren. Unter welchen Voraussetzungen und in welchen Räumen ergibt es Sinn, diese einzuführen? Eine mikroskopische Verkehrssimulation kann On-Demand Verkehre realistisch abbilden und dabei helfen, verschiedenen Parameter zur Einführung zu analysieren.

Im folgenden Kapitel werden, neben SUMO, weitere Simulationsprogramme kurz erläutert. Anschließend werden die Modellregionen ausgewählt und beschrieben, welche zur Analyse der On-Demand Verkehre herangezogen und simuliert werden. Bereits im vorangegangenen Kapitel wurden bereits Inputparameter für die Simulation aufgezählt. Nun werden diese für die Simulation ausgewählt, erklärt und ihre Variation festgelegt. Im weiteren Abschnitt werden die Modellregionen mit Hilfe der SUMO- Anwendungen erstellt, aufgebaut und für die Simulationen vorbereitet.

4.1 Methode: Simulationssoftware

Die Simulationssoftware **SUMO** wurde im Kapitel 2.2 vorgestellt. Es gibt aber noch weitere Simulationsprogramme, mit welchen es möglich ist, On-Demand Verkehre zu simulieren und auszuwerten. **PTV Vissim** ist eine mikroskopische Verkehrssimulation des Unternehmens „PTV Planung Transport Verkehr GmbH“. Die mikroskopische Simulationssoftware gibt einen detaillierten Überblick über das Verkehrsgeschehen und den Verkehrsfluss auf einem bestimmten Verkehrsabschnitt, welcher individuell gestaltet werden kann. Der Straßenverkehr kann realistisch abgebildet und unter verschiedenen Szenarien untersucht werden. Auch mit PTV Vissim ist es möglich, multimodale Verkehrsketten abzubilden. Dabei ist es ebenso möglich autonome Fahrzeuge, welche mit ihrer Umgebung kommunizieren und miteinander vernetzt sind, zu simulieren. Jeder Automatisierungsgrad kann in einer virtuellen Testumgebung und unter realen Verkehrsbedingungen dargestellt und ausgewertet werden. Es ist weiterhin möglich, den öffentlichen Verkehr zu planen, zu verändern und durch verschiedene Maßnahmen sowie dessen Auswirkungen auf den motorisierten Individualverkehr (MIV) zu analysieren. PTV Vissim ist umfangreich und hat viele Möglichkeiten die Mobilität auf mikroskopischer Ebene zu simulieren (vgl. [26]).

Dementgegen steht die makroskopische Verkehrssimulationssoftware **PTV Visum**. Sie ist die führende Software in der Verkehrsplanung. Durch die makroskopische Modellierung

von Verkehrsnetzen und ihrer Nachfrage sowie ÖV- Angeboten können Prozesse im Verkehr abgebildet werden. Dabei können Verkehrsmodelle vom öffentlichen Verkehr, aber auch von PKW, Fußgängern oder shared mobility makroskopisch simuliert werden. Auch bei PTV Visum steht die multimodale Verkehrsmodellierung, Car- und Bike- Sharing und autonome Fahrzeuge im Vordergrund.

MATSim ist ebenso wie SUMO eine open-source Software. Auch MATSim steht in ständigem Entwicklungsprozess. Durch den modularen Aufbau können in MATSim verschiedene Verkehrssimulationen, aber vor allem Transportsimulationen von Personen durchgeführt werden. Die beiden Module „Mobility as a Service (MaaS) und „Mobility on Demand“ (MoD) ermöglichen autonome Fahrzeuge, dynamische Fahrzeugrouten (DVRP) oder Taxi- und Demand Responsive Transport Verkehre (DRT). Diese Module erlauben den Eingriff in die Simulation, während sie läuft. Im Schaubild ist dies durch die DVRP- Erweiterung dargestellt. (vgl. [27]).

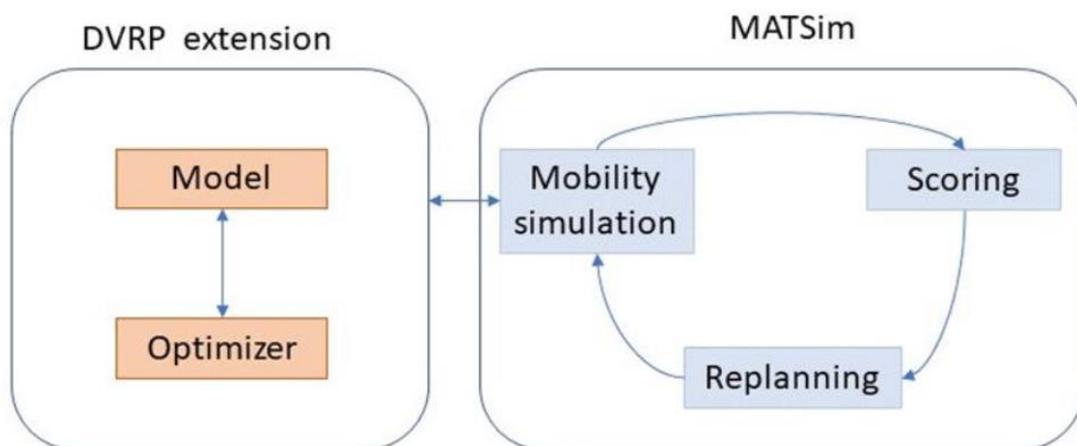


Abbildung 13: MATSims DVRP- Erweiterung [27]

Für die Entwicklung von MATSim ist das Institut für Land- und Seetransport der Technischen Universität (TU) in Berlin zuständig. Zudem ist auch das Institut für Transportplanung der Technischen Hochschule in Zürich (ETH) daran beteiligt (vgl. [28]).

4.2 Auswahl und Variation der Inputparameter

Die Inputparameter, welche in Kapitel 3.4 erläutert wurden, werden im Folgenden noch einmal aufgegriffen und ihre Variation im Laufe der Simulationsdurchläufe erläutert.

Die **Nachfrage** wird angenommen. Das bedeutet, dass sie durch keine empirischen Daten belegbar ist. In Salzgitter-Bad ist diese grob aus Realdaten abgeleitet. Sie wird von Durchlauf zu Durchlauf immer wieder erhöht, um den Grenzen eines On-Demand Systems und seinen Nachfrage-Zielkonflikten näher zu kommen. Das Angebotskonzept wird durch den laufenden flexo- Betrieb definiert. Hier werden Fahrzeuge angelehnt an die realen flexo-Busse verwendet. Die Kapazität dieser beträgt sieben Personen pro Fahrzeug. Eine Fahrzeuganzahl im Untersuchungsgebiet wird je nach Nachfragesituation angepasst. Die Haltestellen im jeweiligen flexo- Gebiet sind auf einer Karte verzeichnet und werden in die Simulation implementiert. Flexo fährt nicht mit elektrifizierten Fahrzeugen. Daher werden keine Elektrofahrzeuge und Elektroladeinfrastruktur simuliert.

Der **Dispositionsalgorithmus** bleibt während der Simulationen identisch. Dieser heißt „Drt.online“ und wird mit Hilfe der TraCi- Schnittstelle in SUMO verwendet. Einzelne Parameter beim Dispositionsalgorithmus, wie der maximale Umwegfaktor, die Zeitschritte zum Rechnen oder die Bereitschaft zum Bündeln können vor jedem Simulationsdurchlauf verändert werden.

Der **Untersuchungsraum** und der **Untersuchungszeitraum** werden am Anfang festgelegt und im Laufe der Simulationen nicht mehr verändert. Nur unter diesen Umständen kann eine Vergleichbarkeit hergestellt werden.

Im folgenden Kapitel werden die Untersuchungsräume (Modellregionen) beschrieben.

4.3 Auswahl der Modellregionen

Bei der Auswahl der Modellregionen wurde sich an den flexo-Regionen des Regionalverbandes Großraum Braunschweig orientiert. Somit ist gewährleistet, dass unter anderem das DLR mit den Auswertungen dieser Arbeit im Anschluss weiterarbeiten kann.

Anhand von folgenden Modellregionen werden On-Demand Verkehre analysiert:

Salzgitter Bad

Der flexo- Raum „Salzgitter-Bad“ ist im Süden des Verbandsgebietes verortet. Er erstreckt sich über die Stadt „Salzgitter-Bad“ bis zum wichtigen Knotenpunkt für den ÖPNV, Salzgitter-Ringelheim. Im Norden gibt es einen zusätzlichen flex-Stop an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften in Salzgitter-Calbecht (Abbildung 14: Steckbrief flexo-Raum Salzgitter-Bad).

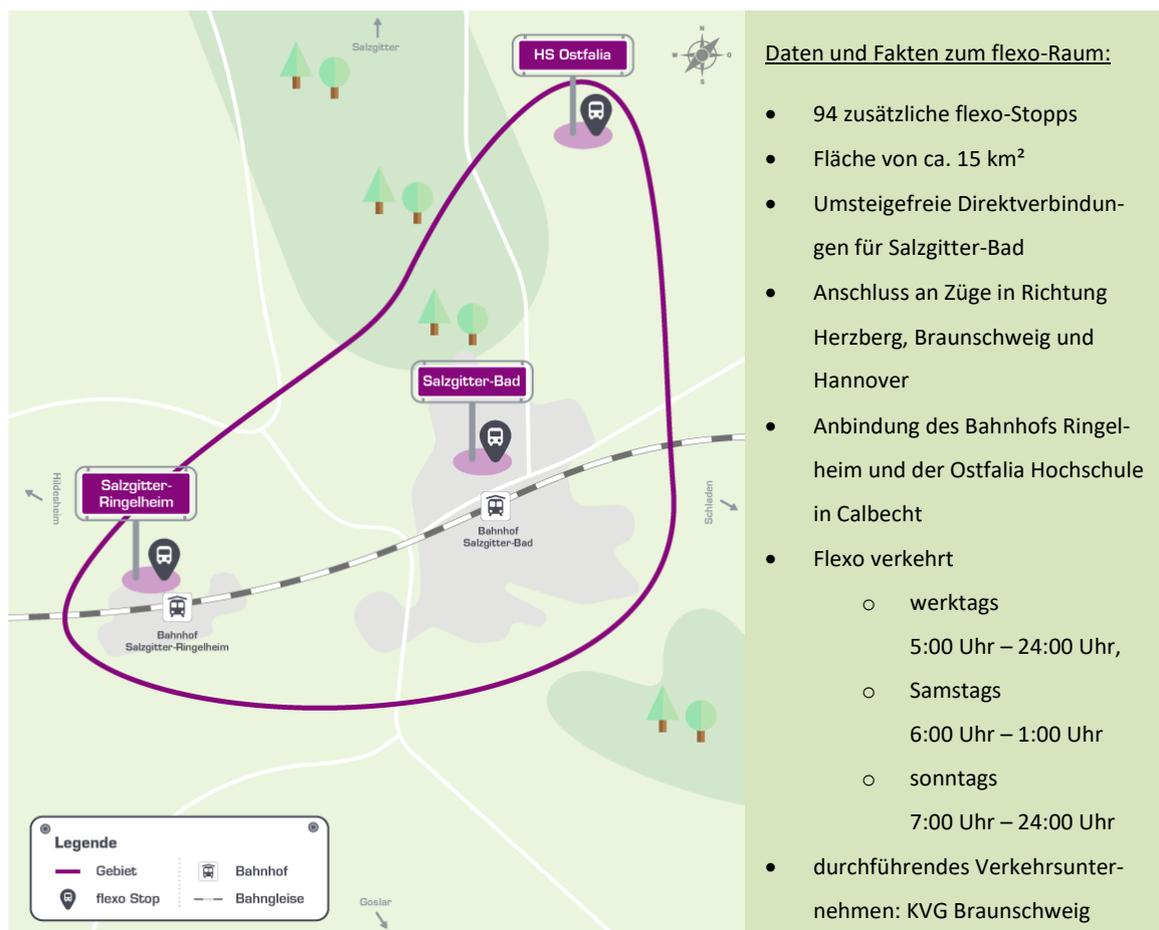


Abbildung 14: Steckbrief flexo-Raum Salzgitter-Bad [35]

Baddeckenstedt – Hoheneggelsen

Das flexo- Gebiet von Söhlde im Norden bis Baddeckenstedt im Süden ist ein ländlich geprägter Raum. Insgesamt umschließt er 13 Ortschaften und zwei Bahnhöfe. Die Ortschaften sind Binder, Baddeckenstedt, Burgdorf, Berel, Burgdorf Bahnhof, Hohenassel, Hoheneggelsen, Nordassel, Oelber am weißen Wege, Rhene, Wartjenstedt, Westerlinde und Söhlde. Die Bahnhöfe befinden sich in Baddeckenstedt im Süden des Gebiets, während der Bahnhof Hoheneggelsen im Norden des Gebiets liegt (Abbildung 15: Steckbrief flexo-Raum Baddeckenstedt/Hoheneggelsen).

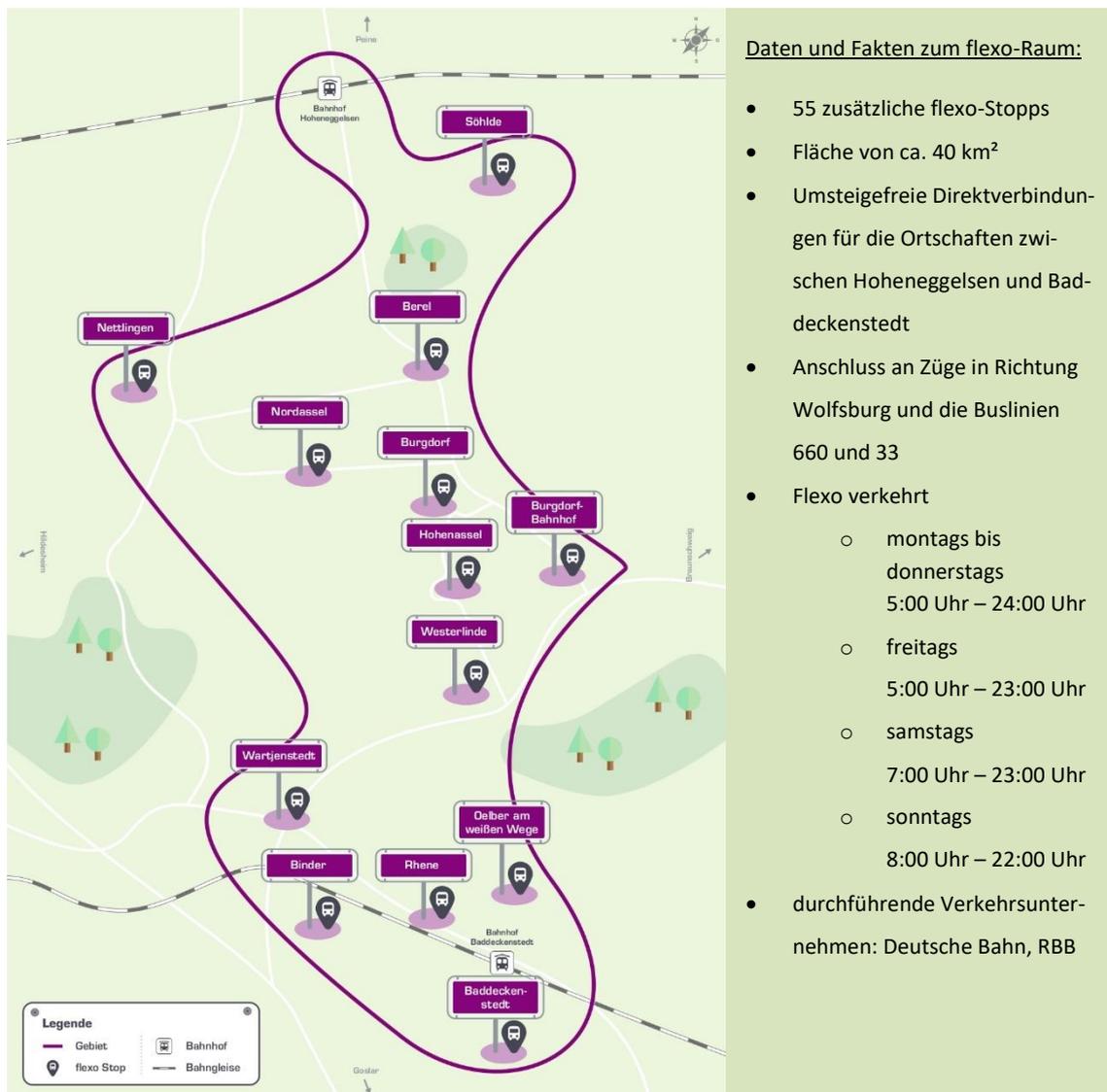


Abbildung 15: Steckbrief flexo-Raum Baddeckenstedt/Hoheneggelsen [36]

4.4 Modellaufbau und Durchführung

Im Folgenden werden die Modellregionen erstellt. Dabei werden die Region Salzgitter-Bad und die Region Hoheneggelsen/Baddeckenstedt aufgebaut und mit den festgelegten Parametern simuliert. Sind die Modellregionen mit den nötigen Inputparametern gefüllt, werden verschiedene Simulationsdurchläufe durchgeführt. Für jede Änderung am Parameter wird mindestens ein neuer Durchlauf gestartet. Die Auswertung erfolgt durch verschiedenen Auswertungsskripte, welche von SUMO- Entwicklern zur Verfügung gestellt wurden. Jeder Simulationsdurchlauf wird in einer Excel Tabelle strukturiert dargestellt. So können die Daten für jede Modellregion, jede Parameteränderung und jeden Simulationsdurchlauf eingesehen und anschließend interpretiert werden. Die Buchungsnachfragen werden über eine Stunde verteilt und über drei Stunden simuliert. Die Ergebnisse von vier Simulationsstunden werden ausgewertet. Dadurch wird der laufende Betrieb mit Vorlauf und Nachlauf abgebildet. Um Umwege aufzeigen zu können, werden ausgewählte Simulationen in beiden Regionen zusätzlich ohne Bündelung von Buchungen ausgewertet (Greedy). Durch den Vergleich der direkten „Start-Ziel-Fahrten“ mit den gebündelten Fahrten werden Unterschiede in der Fahrzeit, Fahrtstrecke (=Umfwegfaktor) sowie der Effizienz des On-Demand Systems untersucht.

Nachdem die optimalen Algorithmus Parameter durch analytisches Vorgehen mit mehreren Simulationsdurchläufen herausgefunden wurden, werden die einzelnen Szenarien simuliert.

Allgemeines zur Simulation:

- Die DRT-Fahrzeuge halten an der Position, an welcher sie ihren letzten Fahrgast abgesetzt haben und warten dort auf neue Aufträge
- Die Simulationen finden ohne Verkehrsaufkommen statt
- Durch den Dijkstra-Routing-Algorithmus wählen die Fahrzeuge immer den kürzesten und schnellsten Weg zum Ziel (Bündelung der Fahrten ausgenommen)
- Der Pooling Algorithmus „drt.online“ ist SUMO spezifisch
- In der Simulation gelten die örtlichen Geschwindigkeitsbegrenzungen, Regeln und Verbote

4.4.1 Region 1: Salzgitter-Bad

Zunächst wurden alle fehlenden flexo- Stops in der Modellregion Salzgitter-Bad in der Nedit-Anwendung von SUMO hinzugefügt. Die fehlenden Stops konnten durch Abgleich mit der Karte der flexo- Stops im Großraum Braunschweig identifiziert werden (vgl. [29]). Anschließend wurde die Modellregionen in vier Traffic Assignment Zones (TAZ) eingeteilt.

Die Abbildung zeigt eine SUMO-Darstellungsform der Modellregion Salzgitter-Bad.

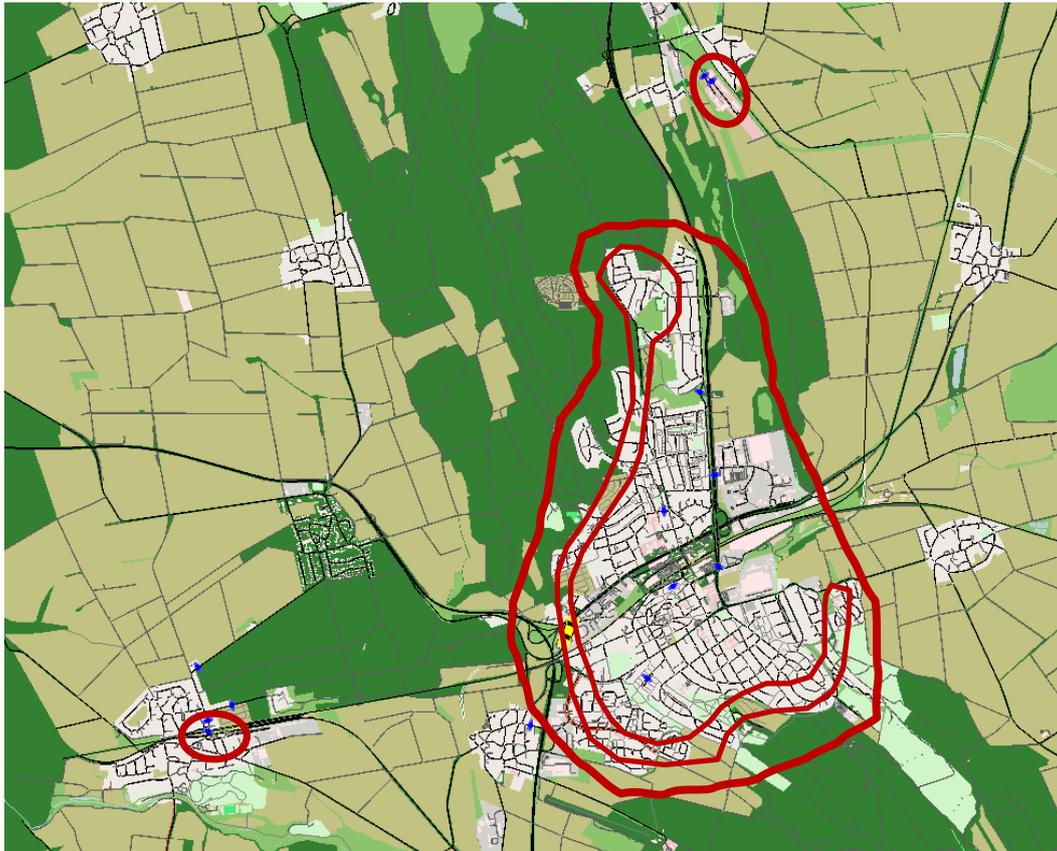


Abbildung 16: Modellregion Salzgitter-Bad in der Simulation mit TAZ

Rot eingezeichnet sind die Traffic Assignment Zones, in welchen Buchungsanfragen zu anderen oder innerhalb der eigenen TAZ entstehen. Die zusätzliche TAZ im Randgebiet von Salzgitter-Bad stellt sicher, dass der Großteil der Buchungsfahrten, welche in Salzgitter-Bad starten und Enden länger als 1,0 km sind. Diesen Effekt vergrößert eine gewichtete Kante am Bahnhof Salzgitter-Bad, welche als Ziel für ein Viertel aller Fahrten in die TAZ „SZ-Bad“ dient.

Die Personen werden in einer Quelle-Ziel Matrix ihren Zielen zugeordnet (Abbildung 17: Beispiel einer Quelle-Ziel-Matrix für die Reisendenbewegung). Von jeder TAZ „reisen“ Personen zu der jeweiligen anderen oder innerhalb einer TAZ und generieren so eine Nachfrage. Auch On-Demand Fahrzeuge (im Folgenden DRT) wurde erstellt. Diese orientieren sich am flexo-Fahrzeug des Regionalverbands Braunschweig und haben eine Sitzkapazität von 8 Sitzplätzen (7 Gäste).

Simulation ID	Quelle TAZ		Ziel TAZ		Intervall [s]		Nachfrage	Nachfrage	Nachfrage
	TAZ ID	TAZ Name	TAZ ID	TAZ Name	Beginn	Ende	[1]/h	[%]	[1]/3h
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
							100	100,00	300

Abbildung 17: Beispiel einer Quelle-Ziel-Matrix für die Reisendenbewegung in Salzgitter-Bad

Die Variationen der Inputparameter werden in einer weiteren Tabelle aufgelistet. Die Nachfrage pro Stunde beginnt bei fünf Buchungen und wird zunächst konstant um weitere fünf erhöht. Ab 20 Buchungen pro Stunde wird die Nachfrage im weiteren Verlauf um 10 Buchungen bis auf 100 Buchungen pro Stunde angehoben. Die Buchungen werden dabei schrittweise auf die TAZ verteilt (siehe Excel Dokument, Quelle-Ziel Matrix). Zur Orientierung dienen reale Quelle-Ziel-Verteilungen des flexo- Verkehrs in Salzgitter-Bad, welche in einem Gespräch mit einem flexo- Ansprechpartner festgelegt wurden [30]. Die Anzahl der Fahrzeuge wird ebenfalls erhöht.

Die jeweilige Anzahl, welche simuliert wird, kann in der folgenden Tabelle abgelesen werden. Diese ergibt sich aus den Ergebnissen und Erfahrungen der Simulationsabläufe (Abbildung 18: Variation der Nachfrage und Anzahl der simulierten Fahrzeuge).

Simulations ID	Untersuchungsraum	Nachfrage [/h] gesamt	Anzahl DRT-Fahrzeuge	Greedy?
SZ1	Salzgitter-Bad	5	10	ja
SZ2	Salzgitter-Bad	10	1,2,10	ja
SZ3	Salzgitter-Bad	15	10	ja
SZ4	Salzgitter-Bad	20	10	ja
SZ4.2	Salzgitter-Bad	20	10	ja
SZ5	Salzgitter-Bad	30	2,3,4,510	ja
SZ5.2	Salzgitter-Bad	30	10	ja
SZ6	Salzgitter-Bad	40	10	ja
SZ6.2	Salzgitter-Bad	40	10	ja
SZ7	Salzgitter-Bad	50	5,10	ja
SZ7.2	Salzgitter-Bad	50	10	ja
SZ8	Salzgitter-Bad	60	10	ja
SZ9	Salzgitter-Bad	70	5,7,8,9,10,11,12,14,15,16,17,20	ja
SZ9.2	Salzgitter-Bad	70	10	ja
SZ9,5	Salzgitter-Bad	75	10	ja
SZ10	Salzgitter-Bad	80	10	ja
SZ10stops	Salzgitter-Bad	80	10	ja
SZ10.2	Salzgitter-Bad	80	10	ja
SZ10.2stops	Salzgitter-Bad	80	10	ja
SZ11	Salzgitter-Bad	90	10	ja
SZ12	Salzgitter-Bad	100	10,15	ja
SZ12.2	Salzgitter-Bad	100	9,10,15	ja
SZ12.3	Salzgitter-Bad	100	10,15	ja
SZ13	Salzgitter-Bad	110	15	ja
SZ14	Salzgitter-Bad	120	15	ja
SZ15	Salzgitter-Bad	130	15	nein

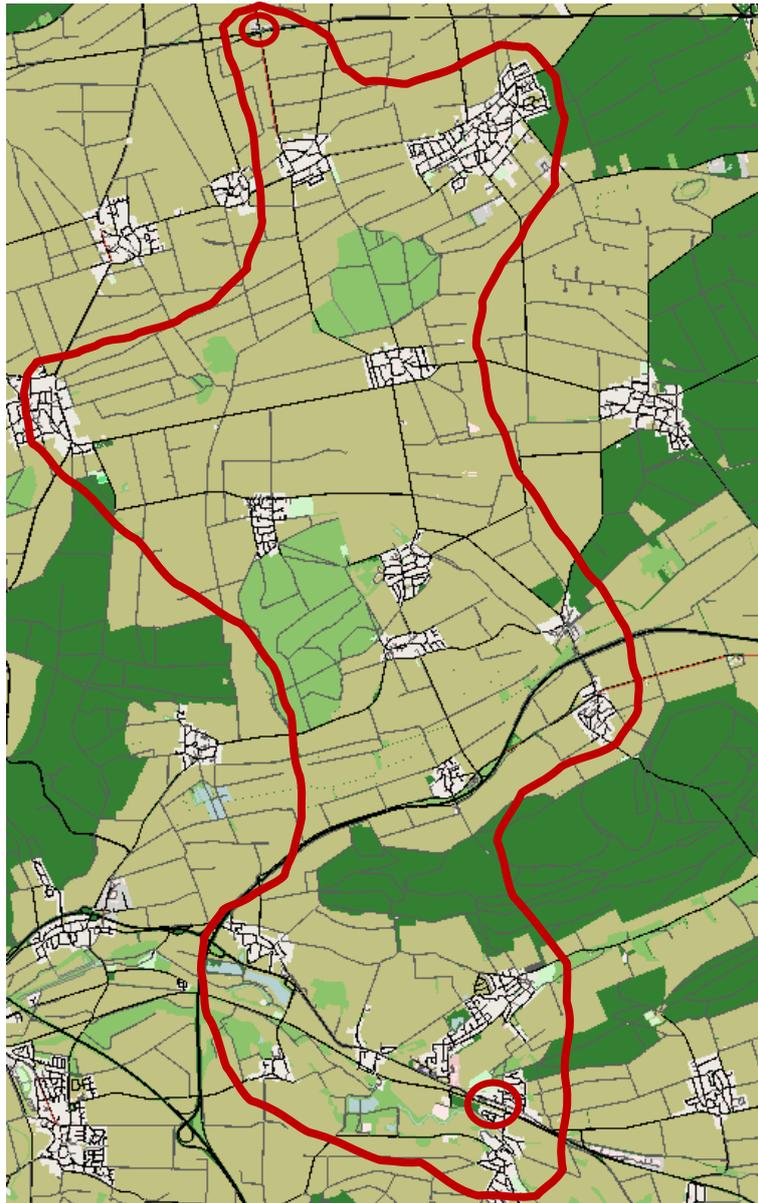
Abbildung 18: Variation der Nachfrage und Anzahl der simulierten Fahrzeuge

Die Kriterien zur Erhöhung der Fahrzeuganzahl sind verschieden. Durch den Abgleich von Simulationen mit unterschiedlicher Fahrzeuganzahl und dessen Ergebnissen hinsichtlich abgeschlossener Buchungen, Umwegfaktor und Reisezeit bzw. Reiselänge oder Systemeffizienz, wird eine optimale Fahrzeuganzahl getroffen. Die Auswirkung der Erhöhung der Fahrzeuganzahl wird ebenfalls untersucht.

4.4.2 Region 2: Hoheneggelsen/Baddeckenstedt

Zunächst wurden alle fehlenden flexo- Stops in der Modellregion Hoheneggelsen/Baddeckenstedt in SUMO hinzugefügt. Die fehlenden Stopps konnten durch Abgleich mit der Karte der flexo- Stops im Großraum Braunschweig identifiziert werden (vgl. [29]).

Die Modellregion Hoheneggelsen/Baddeckenstedt wurde in drei TAZ unterteilt (Abbildung 19: Modellregion Hoheneggelsen/Baddeckenstedt in der Simulation mit TAZ).



**Abbildung 19: Modellregion Hoheneggelsen/Baddeckenstedt
in der Simulation mit TAZ**

Die ländliche Region mit ihren 13 Ortschaften ist eine „große“ TAZ. Des Weiteren wurden den Bahnhöfen in Hoheneggelsen und Baddeckenstedt eine TAZ zugeteilt. So können die Start- und Zielpunkte der Trips gezielt von den Bahnhöfen in die Region und innerhalb der

Region verteilt werden. Auch hier wird die Nachfrage in Fünfer- Schritten erhöht. Ab einer Nachfrage von 20 Buchungen pro Stunde wird diese dann in Zehner- Werten bis 100 Buchungen pro Stunde angehoben. Diese werden in logischer Überlegung auf die unterschiedlich wichtigen TAZ verteilt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Ebenfalls werden die Variationen der verschiedenen Inputparameter, wie Anzahl der DRT-Fahrzeuge oder die Nachfrage in einer Tabelle aufgelistet (Abbildung 20: Variation der Nachfrage und Anzahl der simulierten Fahrzeuge). Durch die hohe Anzahl an Simulationsdurchläufen mit unterschiedlichen Nachfrage- und Fahrzeuganzahlen werden die Grenzen des On-Demand Verkehrs ermittelt. Eine Greedy-Simulation simuliert die direkten Start-Ziel Wege der einzelnen Buchungen im jeweiligen Szenario.

Simulations ID	Untersuchungsraum	Nachfrage [/h] gesamt	Anzahl DRT-Fahrzeuge	Greedy
HB1	Hoheneggelsen/Baddeckenstedt	5	2,5,10	ja
HB2	Hoheneggelsen/Baddeckenstedt	10	2,5,10	ja
HB3	Hoheneggelsen/Baddeckenstedt	15	2,5,10	ja
HB4	Hoheneggelsen/Baddeckenstedt	20	2,5,10	ja
HB5	Hoheneggelsen/Baddeckenstedt	30	2,5,10	ja
HB6	Hoheneggelsen/Baddeckenstedt	40	2,5,10	ja
HB7	Hoheneggelsen/Baddeckenstedt	50	5, 10	ja
HB8	Hoheneggelsen/Baddeckenstedt	60	5, 10	ja
HB9	Hoheneggelsen/Baddeckenstedt	70	6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20	ja
HB10	Hoheneggelsen/Baddeckenstedt	80	10	ja
HB11	Hoheneggelsen/Baddeckenstedt	90	10	ja
HB12	Hoheneggelsen/Baddeckenstedt	100	10	ja

Abbildung 20: Variation der Nachfrage und Anzahl der simulierten Fahrzeuge

5 Auswertung und Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der Simulationen sind in der an die Arbeit angehängten Excel Datei „Auswertung.xlsx“ strukturiert und nach Simulationsraum getrennt dargestellt. Im Laufe des Kapitels wird auf die Excel Tabelle als Quelle zurückgegriffen und Teile daraus als Abbildung verwendet. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse ausgewertet, indem sie verglichen und interpretiert werden. Ein besonderer Blick wird dabei auf die vorher festgestellten Zielkonflikte und Key-Performance-Indikatoren eines On-Demand Verkehrssystems gelegt. Es ist zu beachten, dass die gewonnenen Werte aus der Simulation eine geringe Fehlerquote aufweisen. Durch Ungenauigkeiten, Zufallsvariablen und Rundungsfehler beim Auswertungstool sind Abweichungen nicht auszuschließen. Durch die Wiederholungen von Simulationen mit denselben Parameterwerten konnten eine maximale Abweichung von circa 8 % (2,45 und 2,65, betriebliche Effizienz bei gleichen Parametern) ermittelt werden. Den Zusammenhang zwischen Dienstleistungsqualität, Effizienz und Umwegfaktor und wie sich verschiedene KPI eines On-Demand Verkehrs vom klassischen Taxi hin zum Bündelungsverkehr entwickeln, stellt folgendes Diagramm dar.

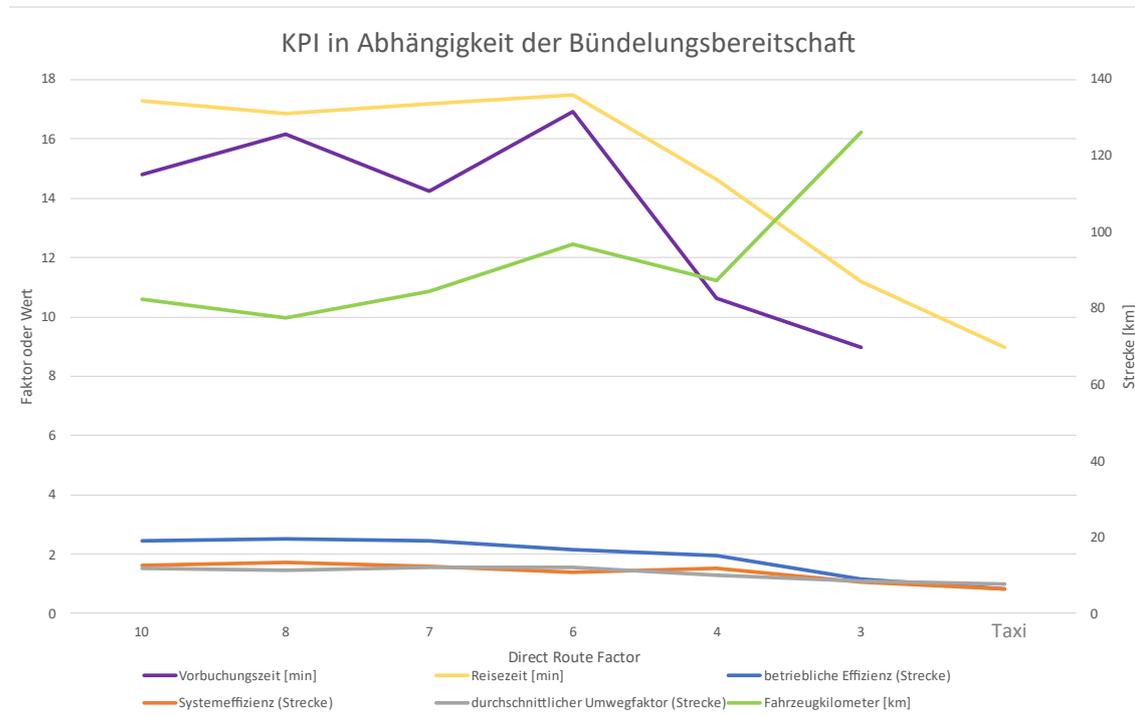


Abbildung 21: Verschiedene KPI in Abhängigkeit der Bündelungsbereitschaft eines Fahrzeugs

Auf der rechten Seite auf der x-Achse ist eine klassische Start-Ziel Fahrt (Taxi) dargestellt. Der „Direct Route Factor“ (drf) begrenzt den maximalen Umweg im Vergleich zum direkten Weg (Taxi) auf das x-Fache. Der Dispositionsalgorithmus versucht möglichst viel zu bündeln, ohne den Grenzwert zu überschreiten. Bei hohen Drf-Grenzwerten und einer hohen Fahrzeuganzahl, wird der Algorithmus unter Umständen nicht alle Fahrzeuge nutzen, da das Bündeln im Rahmen der Grenzwerte Priorität hat. Um die Wirkungen verschiedener Drf-Werte vergleichen zu können, musste die Fahrzeuganzahl bei gleichbleibender Nachfrage entsprechend angepasst werden. Bei geringer Bündelung müssen mehr Fahrzeuge zur Verfügung stehen, um die Nachfrage befriedigen zu können. Bei 15 Fahrzeugen und einem geringen Direct Route Factor sind Reisezeiten und die betriebliche sowie Systemeffizienz auf einem Minimum. Hier sind viele Fahrzeuge unterwegs und erhöhen lediglich die Fahrzeugkilometer (grün). Steigt der drf, sinkt die Anzahl an Fahrzeugen, welche der Algorithmus einsetzt. Das ist gut für den Betreiber, aber schlecht für den Nutzenden. Dann dürfen Fahrzeuge große Umwege für die Fahrgäste in Kauf nehmen und damit vermehrt bündeln. Folgend steigen die Effizienzen und auch die Reisezeiten und Vorbuchungszeiten.

In den folgenden Simulationen wird der drf auf 10 gesetzt, um das Bündeln zu ermöglichen. Werden die Auswirkungen von höheren Fahrzeugzahlen auf die KPI untersucht, wird der drf angepasst, damit diese auch eingesetzt werden.

5.1 Darstellung und Interpretation der Sensitivitäten: SZ-Bad

Bei der Durchführung der Simulationen wurden immer wieder Parameter verändert und die Auswirkungen auf die KPIs untersucht. Im Folgenden werden die wichtigsten Key-Performance-Indikatoren eines On-Demand Systems und dessen Sensitivitäten, welche im Laufe der Simulationen erkannt wurden, erklärt.

Fahrzeuganzahl und Nachfrage:

Eine wichtige Frage wird während der Simulationsdurchführungen und der Suche nach passenden Parametern für den Algorithmus bereits beantwortet. Welche Nachfrage hat einen Einfluss auf die Kapazität des On-Demand Systems bei einer spezifischen Anzahl an Fahrzeugen? Bei welcher Nachfrage ist es notwendig ein Fahrzeug zusätzlich einzusetzen?

Bei den nachfrageschwachen Simulationen ist dies nicht eindeutig. Ein „langer Trip“, zum Beispiel von Ringelheim zur Ostfalia Hochschule, nimmt circa ein Viertel der Simulationsstunde ein. Da bei geringer Nachfrage nur ein On-Demand Fahrzeug eingesetzt wurde, hat dieser Trip eine große Auswirkung auf die Werte, wie Reisezeit oder Streckenlänge und damit auf die gesamte Anzahl an absolvierten Buchungen in der Simulationsstunde. Werden folglich mehrere Fahrzeuge eingesetzt und die Nachfrage erhöht, hat ein langer Trip keine großen Auswirkungen auf die Simulation, da parallel weitere Fahrzeuge Buchungen absolvieren können. Generell lässt sich feststellen, dass es erst ab einer Nachfrage von circa 20 Buchungen pro Stunde sinnvoll ist die Auswirkungen der Nachfrage auf die Fahrzeuganzahl zu betrachten.

Die Grenzen der Fahrzeuganzahl sind zwar nicht eindeutig zu definieren, lassen sich gut erkennen, wenn viele Simulationen mit unterschiedlichen Sensitivitäten durchgeführt wurden. Die Fahrzeuganzahl und die Nachfrage werden dementsprechend oft verändert. Im Laufe der Simulationen können Gemeinsamkeiten, Unterschiede und verschieden große Abweichungen festgestellt werden. Ein Merkmal davon ist die Auslastung der Fahrzeuge. So fällt auf, dass bei „zu vielen“ Fahrzeugen für eine Nachfrage, einige Fahrzeuge nur gering oder sogar gar nicht benutzt werden. Das ist folgend im Szenario SZ9 der Fall.

Wenn Fahrzeuge durchgehend ausgelastet sind, lässt sich das an den Fahrzeugkilometern im Vergleich zu Durchläufen mit geänderter Fahrzeuganzahl erkennen. Steigt dann die Nachfrage, geht dies auf Kosten der Trips, welche pro Stunde abgefertigt werden können. Folglich muss die Fahrzeuganzahl erhöht werden, denn obwohl mehr Fahrzeuge senken die Tripdauer und Länge senken, haben diese jedoch einen höheren Leerkilometeranteil und bündeln weniger. So ist es besser, ein zusätzliches Fahrzeug, um für eine höhere Anzahl abgeschlossener Fahrten garantieren zu können.

Nur bei einem „optimalen“ Verhältnis von Nachfrage und Fahrzeuganzahl werden alle Fahrzeuge voll benutzt, ohne dass Buchungen abgelehnt werden müssen. Handelt es sich um zu wenig Fahrzeuge, müssen Fahrten abgelehnt werden. Im Szenario SZ9 ist dies der Fall ab einer Fahrzeuganzahl von 7 Fahrzeugen und weniger.

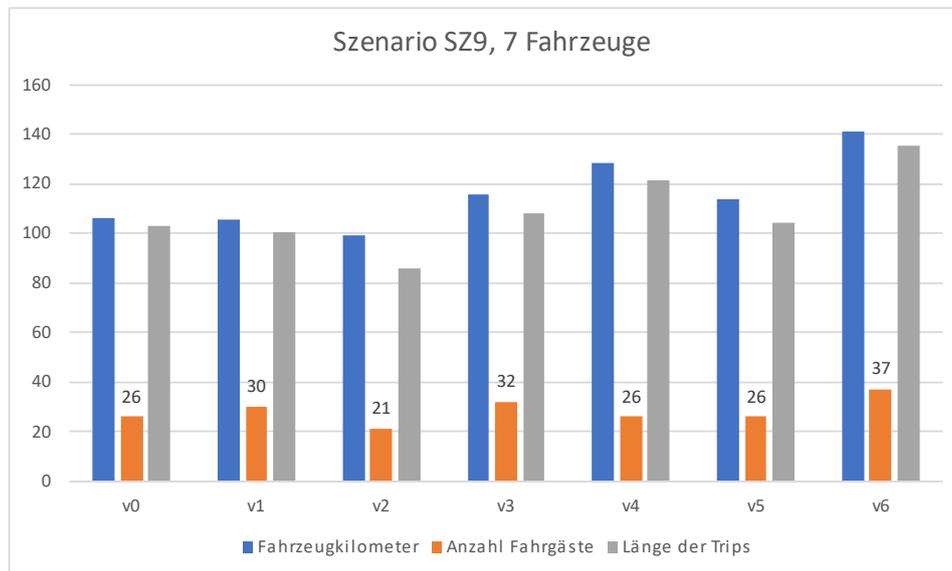


Abbildung 22: Fahrzeugkilometer, Anzahl Fahrgäste und Triplänge bei SZ9 und 7 Fahrzeugen

Die Abbildung zeigt die Fahrzeugkilometer, Anzahl Fahrgäste und Triplänge von den 7 Fahrzeugen aus dem Szenario SZ9. Es ist zu erkennen, dass alle Fahrzeuge benutzt werden. Dennoch werden Fahrten abgelehnt. Dennoch sind die Fahrzeuge ab einer bestimmten Anzahl nicht mehr ausgelastet. In Salzgitter-Bad ist dies bei der Fahrzeuganzahl von 10 Fahrzeugen der Fall.

Auf der Abbildung 23: Fahrzeugkilometer, Anzahl Fahrgäste und Triplänge bei SZ9 mit 14 Fahrzeugen ist zu erkennen, dass nicht alle Fahrzeuge in Bewegung sind. Während sechs Fahrzeuge über 80 Kilometer fahren, sind vier Fahrzeuge gar nicht und zwei selten unterwegs. Dazwischen liegt die optimale Anzahl von 8 Fahrzeugen bei einer Nachfrage von 70 Buchungen pro Stunde und damit die Grenze des On-Demand Systems.

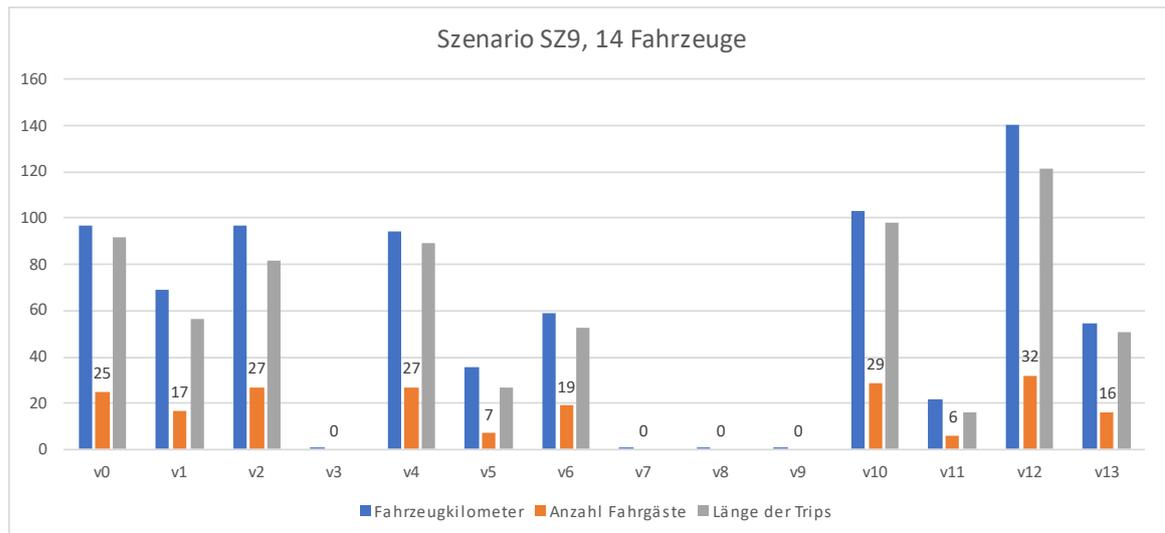


Abbildung 23: Fahrzeugkilometer, Anzahl Fahrgäste und Triplänge bei SZ9 mit 14 Fahrzeugen

Hier fahren alle Fahrzeuge und transportieren im Durchschnitt circa 25 Personen. Diese Erkenntnisse belegen auch die Effizienzen der einzelnen Durchgänge in den Szenarien.

Ein weiterer Indikator, welcher die Erhöhung der Fahrzeuganzahl rechtfertigt, ist die absolute Fahrstrecke der Fahrzeuge. Steigt diese bei sich erhöhender Fahrzeuganzahl stark an, ergibt es Sinn, die Fahrzeuganzahl weiter zu erhöhen. Sinkt, stagniert oder steigt diese nur gering an, ist dies ein Zeichen, dass einige Fahrzeuge nicht „voll ausgelastet“ sind. Parallel dazu ist die durchschnittlich zurückgelegte Fahrstrecke möglichst maximal zu halten (maximale Auslastung).

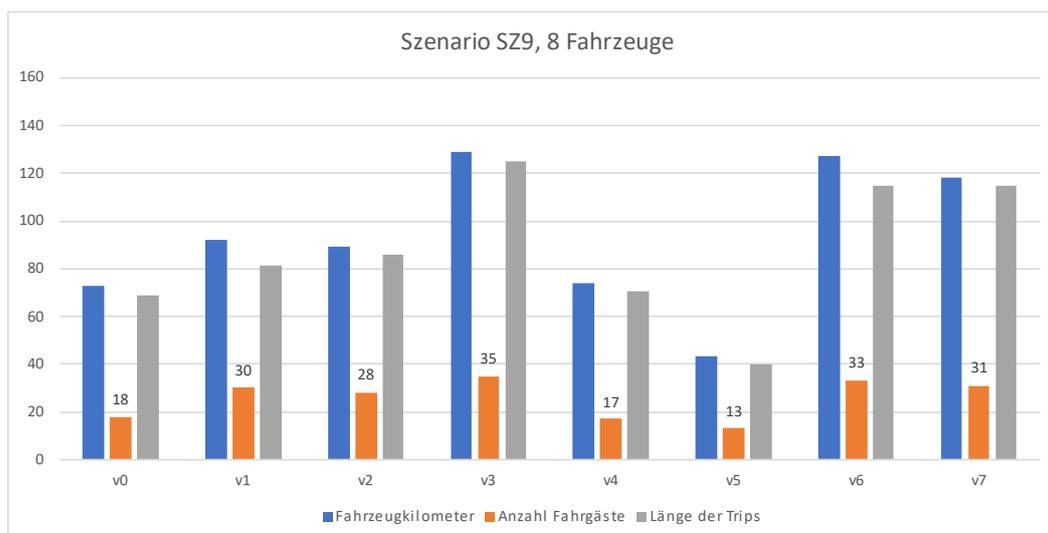


Abbildung 24: Fahrzeugkilometer, Anzahl Fahrgäste und Triplänge bei SZ9 mit 8 Fahrzeugen

Das Szenario SZ9 ist dadurch ein passendes Beispiel, um die Fahrzeuganzahl zu erhöhen und so nicht nur mehr Buchungen annehmen zu können und um zu erkennen, wann mehr Fahrzeuge eingesetzt werden sollten, sondern auch den Umwegfaktor und Systemeffizienz zu verbessern.

Die Anzahl an Fahrzeuge, welche eingesetzt werden sollten, steigt theoretisch von Szenario zu Szenario mit steigender Nachfrage an. So bleiben die Systemeffizienz und Auslastung möglichst hoch. Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft die „optimale“ Anzahl der Fahrzeuge in Abhängigkeit der Nachfrage.

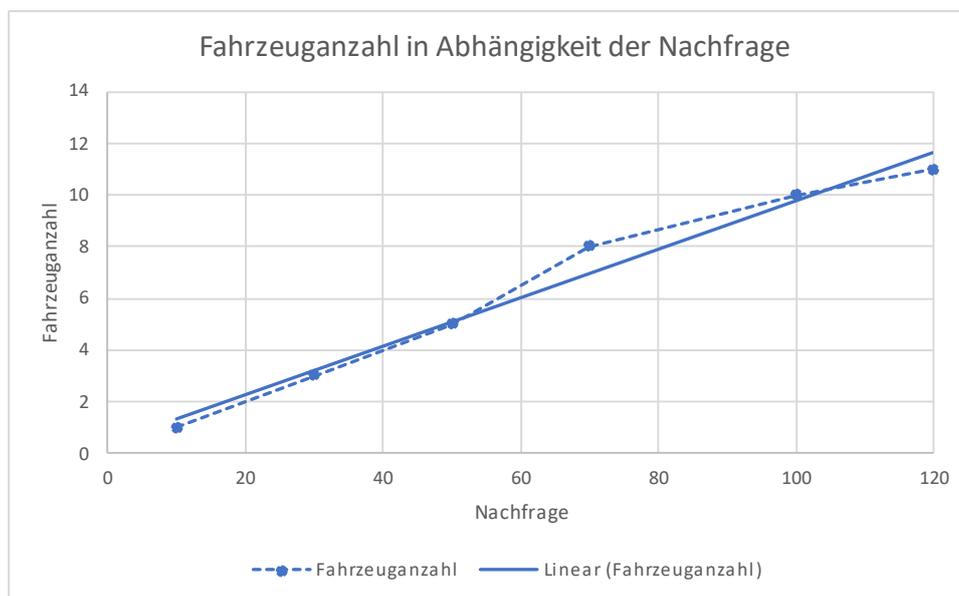


Abbildung 25: Grafische Abbildung der Sensitivität von Fahrzeuganzahl und Nachfrage

Effizienzen:

Hier wird zwischen der betrieblichen Effizienz, also dem Nutzen- Aufwand Verhältnis der gefahrenen Personenkilometer und der Systemeffizienz, also dem Nutzen-Aufwand Verhältnis der gebuchten Personenkilometer unterschieden. Die betriebliche Effizienz kann als Auslastung bzw. Belegungsgrad der Fahrzeuge verstanden werden.

Steigt die Systemeffizienz gibt sie dem On-Demand System ein sich sowohl für den Kunden als auch für den Dienstleister lohnendes Gesamtgefüge. Die Systemeffizienz ist unabhängig vom Umwegfaktor. Steigt der Umwegfaktor (schlecht für den Fahrgast) kann die Systemeffizienz weiterhin konstant bleiben oder steigen. Dadurch ist es sinnvoll, die Systemeffizienz

zu betrachten. Bei der betrieblichen Effizienz kann es als Ziel verstanden werden, diese möglichst ansteigen zu lassen, da sie die Auslastung eines Fahrzeuges angibt.

Wie schon in Kapitel 1.4 angedeutet, ist der durchschnittliche Belegungsgrad eines PKWs im Individualverkehr circa 1,36. Bei einem On-Demand Verkehr mit der Möglichkeit zu bündeln, sollte mindestens ein Wert von 1,0 übertroffen werden, da dieser bedeutet, dass nur eine Person pro Fahrzeug fährt. 1,36 soll möglichst erreicht werden, um den Durchschnitt des MIV zu übertreffen, um zur Nachhaltigkeit im Verkehr und Mehrwehrt für die Gesellschaft beizutragen.

Die Systemeffizienz und betriebliche Effizienz sind in jedem Szenario bei jedem Durchlauf unterschiedlich. Hier wird der Zusammenhang zwischen den Effizienzen und der Fahrzeuganzahl zur Nachfrage deutlich. Wird sich einer „optimalen“ Zusammensetzung zwischen Nachfrage und Fahrzeuganzahl angenähert, wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, so steigen die betriebliche Effizienz und die Systemeffizienz. Ein „optimales“ Szenario ist folglich dann, wenn das Verhältnis von Nachfrage und Fahrzeuganzahl die besten Effizienzen in diesem Simulationsdurchlauf ergibt.

Im ersten Schritt wird innerhalb eines Szenarios, also bei **gleichbleibender Nachfrage, die Fahrzeuganzahl verändert**. So lassen sich die Grenzen der Fahrzeuganzahl mit Hilfe der Sensitivität von betrieblicher Effizienz und Systemeffizienz in einem Szenario folglich abbilden.

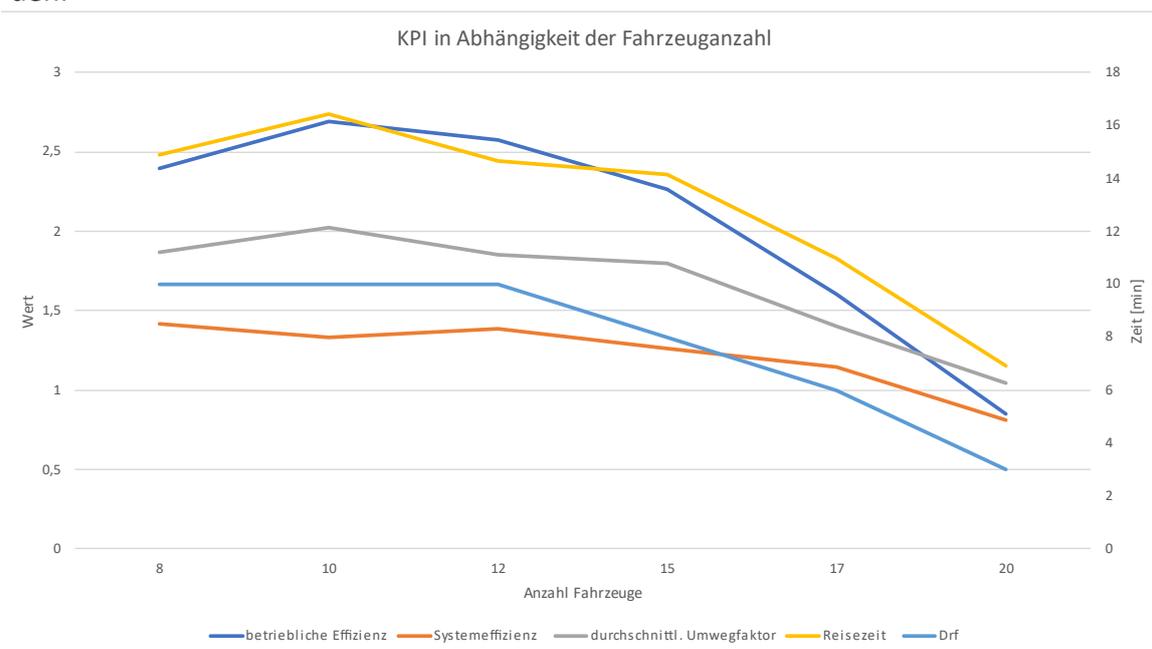


Abbildung 26: Sensitivitäten der Fahrzeuganzahl in SZ9

Am Beispiel des Szenarios SZ9 (Abbildung 26: Sensitivitäten der Fahrzeuganzahl in SZ9) ist zu erkennen, dass die betriebliche Effizienz und Systemeffizienz mit sinkender Fahrzeuganzahl ansteigen. Gestartet mit 20 eingesetzten Fahrzeugen wurde die Anzahl bei gleicher Nachfrage reduziert. Der Umwegfaktor, also der Unterschied der beiden Effizienzen, wird bei geringer Fahrzeuganzahl immer größer, da ein Fahrzeug weitere Distanzen zwischen den Buchungen zum Bündeln zurücklegen muss. Dadurch steigt auch die betriebliche Effizienz. Die optimale Fahrzeuganzahl für das Szenario liegt hier bei 10 Fahrzeugen. Gleichzeitig ist auch die Grenze nach unten zu erkennen. Ab 7 Fahrzeugen kann die Nachfrage nicht mehr befriedigt werden. Mit sinkender Fahrzeuganzahl steigen die betriebliche und Systemeffizienz an. Die Reisezeit sinkt mit steigender Fahrzeuganzahl, da das Bündeln durch genügend Fahrzeuge wegfallen kann und kaum mehr Umwege gefahren werden müssen.

Wird die Systemeffizienz und betriebliche Effizienz nun in Abhängigkeit sich verändernder Nachfrageanzahl, das heißt **szenarioübergreifend** betrachtet, können die Grenzen der Nachfrage bei einer bestimmten Fahrzeuganzahl analysiert werden. Es fällt auf, dass die betriebliche Effizienz bei **konstant bleibender Fahrzeuganzahl** mit steigender Nachfrage beschränkt steigt. Ab einer gewissen Nachfrage stagniert diese jedoch. Mit der festen Fahrzeuganzahl ergibt sich dann auch keine bessere Systemeffizienz und die Leistungsfähigkeit

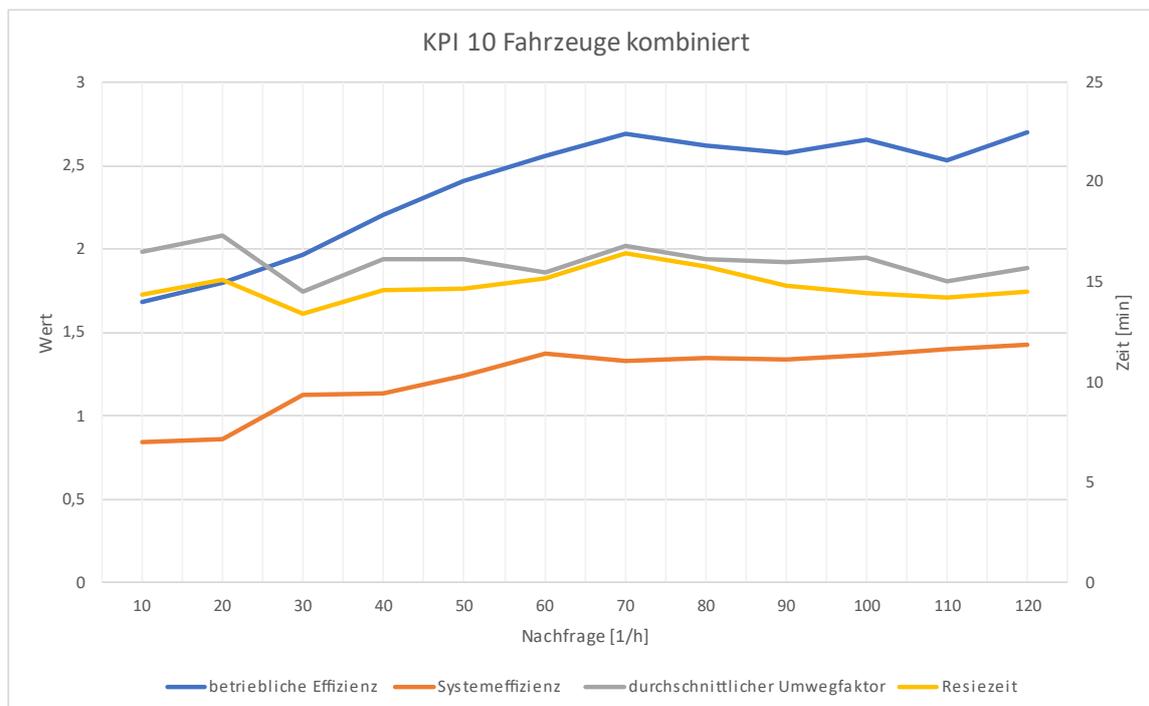


Abbildung 27: Effizienzen, Umwegfaktor und Reisezeit bei konstanter Fahrzeuganzahl im Überblick

ist erreicht (siehe Abbildung 27: Effizienzen, Umwegfaktor und Reisezeit bei konstanter Fahrzeuganzahl im Überblick).

Bei einer Fahrzeuganzahl von 10 Fahrzeugen in Salzgitter-Bad ist dieser Punkt bei einer Nachfrage von maximal 130 Buchungen in einer Stunde erreicht. Dabei wurden ab einer Nachfrage von 100 Buchungen pro Stunde 15 Fahrzeuge eingesetzt, da sich Fahrzeuge bei erhöhter Nachfrage aufgrund eines Fehlers der Simulationssoftware festfuhren. Es ist zu erkennen, dass sich die betriebliche Effizienz dem Wert 2,7 durch eine beschränkte Kurve annähert. Während die betriebliche Effizienz durch ein leicht beschränktes Wachstum in Salzgitter-Bad gekennzeichnet ist, steigt die Systemeffizienz bis zum „optimalen Verhältnis“ von Nachfrage und Fahrzeuganzahl linear an. Es ist deutlich zu sehen, dass eine Nachfrage von 30 (SZ5), besser 60 (SZ8) Buchungen pro Stunde erreicht werden muss, damit eine sich für den Betreiber lohnende Systemeffizienz erreicht wird. Der Umwegfaktor bleibt auf konstantem Niveau, wenn die Nachfrage erhöht wird, obwohl die Effizienzen steigen. Das liegt an den hinzukommenden Fahrgästen bei den bereits existierenden Bündelungsfahrten und daran, dass der Dispositionsalgorithmus nach Drf- Vorgabe bündelt, auch wenn genügend Fahrzeuge zur Verfügung stehen.

Wird die Nachfrage auf 130 Buchungen pro Stunde gesteigert (SZ15) kann diese durch die 10 Fahrzeuge nicht mehr gedeckt werden und Buchungen würden abgelehnt, was die Systemeffizienzen der Auswertungen beeinflussen. Das Ziel ist es, möglichst keine Fahrt ablehnen zu müssen. So können die Simulationen am besten miteinander verglichen werden.

Die Reisezeit in den verschiedenen Simulationsdurchläufen konstant. Ihr Mittelwert liegt bei 14,81 Minuten (min). Die Schwankungen sind auf Zufallsvariablen beim Simulieren zurückzuführen. Auch die betriebliche Effizienz und Systemeffizienz ist am geringsten, wenn zu viele Fahrzeuge für die Nachfrage im Verkehrssystem unterwegs sind. Durch geringe Auslastungen der Fahrzeuge (und aufgrund hohem Drf) sind die Belegungsgrade und Umwege gering.

Die entscheidende Leitfrage „wie hoch die betriebliche Effizienz überhaupt steigen?“ kann durch den Graphen beantwortet werden. Die Grenze der betrieblichen Effizienz bei den gegebenen Parametern (10 Fahrzeuge, drf10) liegt hier bei 2,7. Auch die Systemeffizienz wird nicht höher als 1,45 steigen, da die Fahrzeuge ab einer Nachfrage von über 130 Buchungen pro Stunde nicht mehr alle Buchungen befriedigen können.

Umwegfaktor:

Im obenstehenden Abschnitt über die Nachfrage und Fahrzeuganzahl ist der Umwegfaktor ein wichtiger Indikator. Dieser kann eine Erhöhung der Fahrzeuganzahl begründen, denn mit Erhöhung der Fahrzeuganzahl der Umwegfaktor sinken ohne, dass Fahrten abgelehnt werden. Er wird als Differenz zwischen betrieblicher Effizienz und Systemeffizienz verstanden. Da bei der Berechnung der Systemeffizienz die gebuchten Fahrzeugkilometer miteinfließen, werden bei der betrieblichen Effizienz die gesamten Fahrzeugkilometer inklusive Umwege benutzt (Abbildung 27: , Kapitel 3.3.2). Bei Szenarien, welche durch eine Sensitivität zwischen Nachfrage und Anzahl Fahrzeuge als „optimal“ eingestuft sind, sind die Reisezeiten kurz und die Umwege geringer als bei „nicht-optimalen“ Durchläufen. Im Durchschnitt beträgt der Umweg im besten Szenario (SZ14, 11 Fahrzeuge) + 98% auf die Gesamtstrecke. Bei einzelnen Fahrten ist der Umweg jedoch deutlich höher und erreicht teilweise über das Dreifache der eigentlichen Streckenlänge (18 % der Fahrten).

Deutlich zu sehen ist dies anhand der folgenden Abbildung.

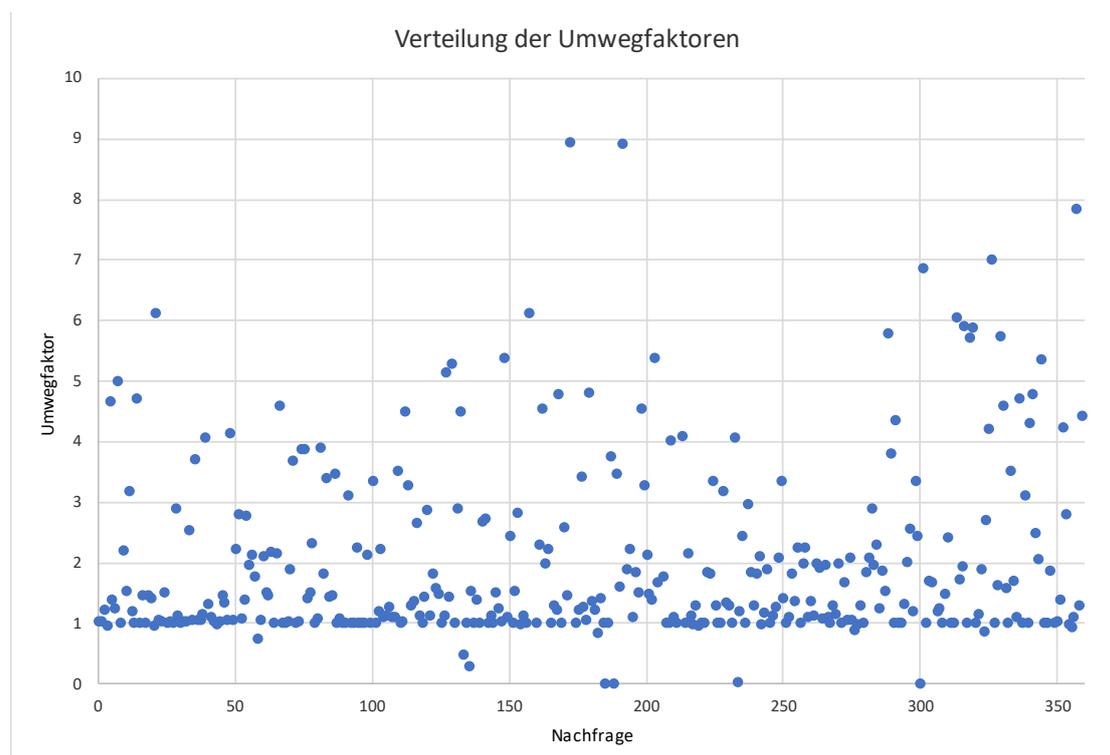


Abbildung 28: Verteilung der Umwegfaktoren bei 360 Trips

Die Abbildung zeigt die Verteilung der verschiedenen Umwege von allen durchgeführten Trips im Szenario SZ14 mit einer Fahrzeuganzahl von 11 Fahrzeugen. Bei den kurzen Wegen im Modellraum Salzgitter-Bad müssen circa 64 Fahrgäste (18%) einen Umweg vom mehr

als dem Dreifachen des direkten gebuchten Weges in Kauf nehmen. Der Großteil der Fahrgäste hat jedoch einen geringen Umweg zu fahren.

Steigt die Anzahl an DRT- Fahrzeugen an, so sinkt der Umweg teilweise stark. Dies hat jedoch Folgen für andere Indikatoren, wie betriebliche Effizienz und Leerkilometeranteil. Je höher der Umwegfaktor ist, desto länger werden die Reisezeit und Fahrtstrecke der Personen. Die Grenzen des zu akzeptierenden Umwegs sind schwer zu bestimmen. Jeder Fahrgast hat ein individuelles Empfinden, ab wann er welchen Umweg akzeptiert und ab welcher Zeit oder welcher Strecke dieser die Fahrt nicht antreten würde. Im Szenario SZ14 hat der Großteil der Fahrgäste zwar einen geringen Umweg von ihrem direkten Weg, jedoch haben rund 19 Personen einen sehr langen Umweg (Umwegfaktor >5) zu fahren haben. Diese Personen zeigen die Grenze des zu akzeptierenden Umweges auf. Diese könnte in diesem Fall bei einem Umwegfaktor von 3 bis 4 liegen.

Welchen Einfluss das Bündeln auf die Trips der einzelnen Fahrgäste hat, zeigt der Vergleich von gebuchten Wegen mit den gebündelten Wegen im On-Demand Verkehr im Szenario SZ9 mit 10 Fahrzeugen (Abbildung 29: Vergleich der Histogramme „Bündelungsverkehr“ und gebuchter Weg). Durch das Bündeln werden die Wege länger, dies hält sich jedoch in Grenzen. Der Großteil (148) der Fahrten haben eine Länge bis 13 km im On-Demand Verkehr. 179 gebuchte Fahrten hingegen sind bis 7,5 km zu verzeichnen. Ungefähr die Hälfte aller Trips hat einen Umweg vom Zweifachen der gebuchten Strecke.

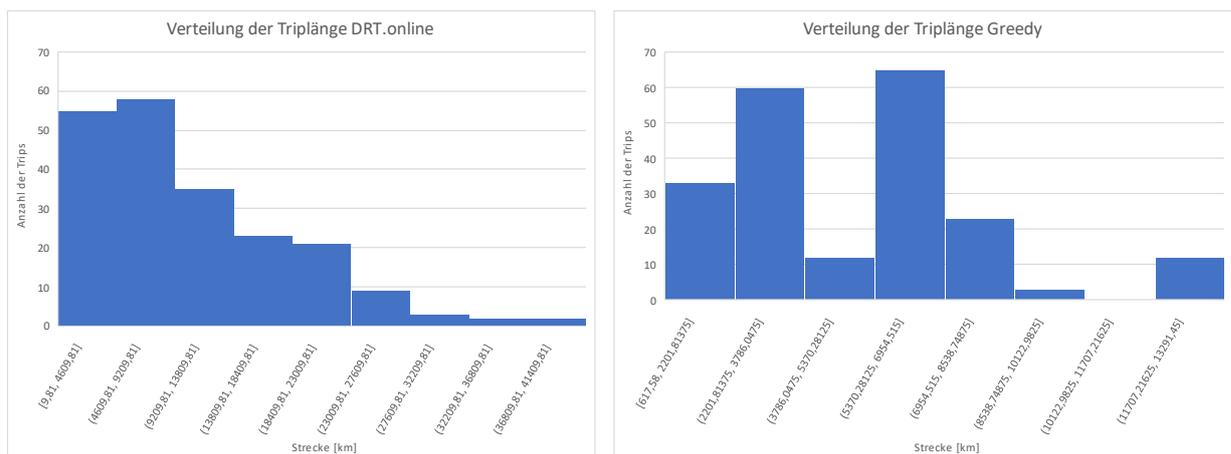


Abbildung 29: Vergleich der Histogramme „Bündelungsverkehr“ und gebuchter Weg

Leerkilometer:

Es ist wichtig, den Leerkilometeranteil zwischen einer abgeschlossenen Fahrt und dem Startpunkt für die neue Fahrt möglichst gering zu halten. Bei hoher Nachfrage ist dies einfach. Bei geringer Nachfrage haben die Fahrzeuge jedoch weite Wege zwischen einer abgeschlossenen Fahrt und dem Startpunkt einer neuen Fahrt, d.h. mit einem neuen Fahrgast, zurückzulegen. Durch das postprocessing-Auswertungstool sind die durchschnittlichen Leerkilometer in der Simulationsstunde ausgegeben worden. Somit lässt sich zwischen den Simulationen gut unterscheiden welche Szenarien einen hohen Leerkilometeranteil pro Stunde haben. Die Leerkilometer in Salzgitter-Bad steigen mit ansteigenden Fahrzeuganzahlen und/oder sinkender Nachfrage.

Die Abbildung zeigt den sinkenden Leerkilometeranteil bei steigender Nachfrage. Der Leerkilometeranteil liegt bei einer Nachfrage bis 120 Buchungen pro Stunde im Durchschnitt bei circa 10,5 %.

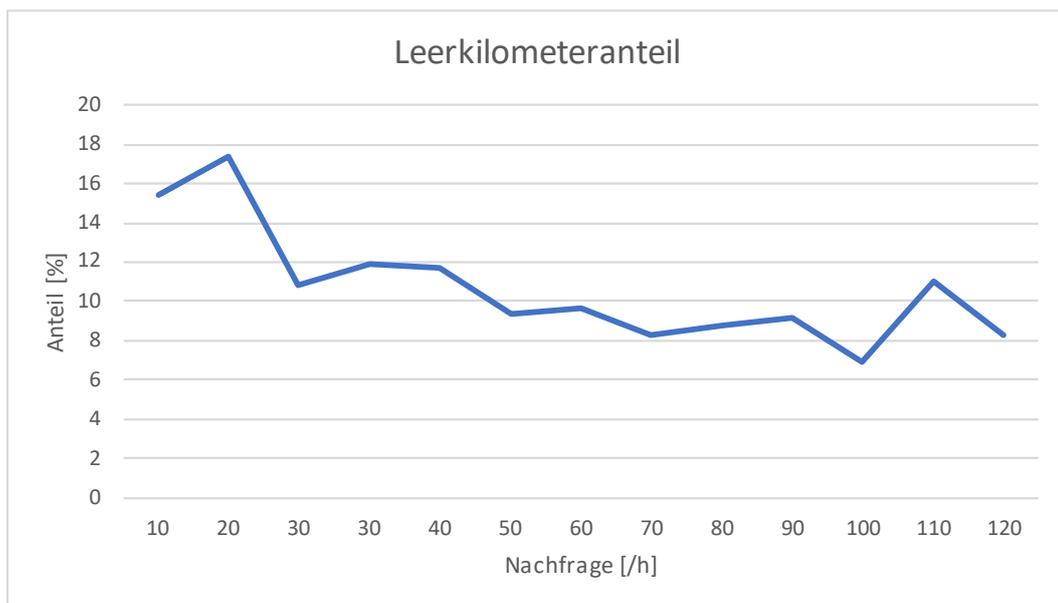


Abbildung 30: Anteil Leerkilometer an den Gesamtkilometern

Haltestellendichte:

Es ist auffällig, dass der räumliche Umwegfaktor bei circa 2 liegt, während der zeitliche Umwegfaktor noch höher ist (circa 2,5). Daher wurde untersucht, ob dies mit der Anzahl an Haltestellen zusammenhängt, welche in Straßen mit geringer Geschwindigkeitsvorgabe liegen.

Die Haltestellendichte in Salzgitter-Bad ist sehr hoch. Durch zusätzliche flexo Stopps wurden über 90 neue Haltestellen hinzugefügt. Das bedeutet auch, dass die Fahrgäste einen kurzen Weg zurücklegen müssen, um von ihrem Startpunkt zur Haltestelle zu gelangen. Es zeigt sich, dass die Haltestellendichte in den Simulationsszenarien eine eher geringe Auswirkung auf die Reisezeit und Streckenlänge haben, wenn diese gleichbleibt. Lediglich einige wenige Fahrgäste haben einen weiten Fußweg zurückzulegen. Diese haben jedoch bei hoher Nachfrage keine Auswirkung auf den durchschnittlichen Fußweg. werden. Ein Fahrgast hat einen durchschnittlichen Fußweg von 100 bis 130 Metern.

Wird die Haltestellendichte durch das Entfernen von Haltestellen in verkehrsberuhigten Bereichen und 30er-Zonen verringert, hat dies teils gravierende Auswirkungen auf die KPI der einzelnen Simulationen.

1. Haben die Fahrgäste durch das Durchfahren von verkehrsberuhigten Bereichen und 30er-Zonen vorher viel Zeit verloren und im Durchschnitt das Dreifache an Zeit im Vergleich zum direkten Weg benötigt, um zum Ziel zu gelangen, so verringert sich die Reisezeit bei geringerer Haltestellendichte auf circa 13,2 min.
2. Zudem werden nun weniger Fahrten abgelehnt, wie am Beispiel von SZ10 (Nachfrage 80) und einer Fahrzeuganzahl von 10 Fahrzeugen zu erkennen ist. Mit hoher Haltestellendichte, inklusive Haltestellen in verkehrsberuhigten Bereichen und 30er-Zonen, wurden bis zu 7 % aller Fahrten abgelehnt und die durchschnittliche Reisezeit war um das 2,7fache höher als der direkte Weg. Die gefahrene Strecke im Vergleich zum direkten Weg erhöht sich nur um 50 %.
3. Bei reduzierten Haltestellendichte bleibt die durchschnittlich gefahrene Strecke ungefähr gleich (50 %). Die Reisezeit sinkt jedoch um circa 2 min (-13 % im Vergleich zur hohen Haltestellendichte) im Durchschnitt.
4. Der Weg zur Starthaltestelle erhöht sich von circa 95 Meter auf 120 Meter.

Die Abbildung 31: Ausgabe der Simulationsergebnisse von SZ14 zeigt eine ausgewählte Ausgabe der Simulationsdurchläufe mit realer Haltestellenverteilung (Durchlauf 1 und 2) und ohne Veränderung der Haltestellendichte („Haltestellen“). Hier sind die genannten Punkte 1 bis 3 zu erkennen.

Simulations ID Durchlauf	Einheit	SZ14				
		Haltestellenc	Greedy	Durchlauf 1	Durchlauf 2	Greedy
Simulationszeitraum	s	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400
Direct Route Factor (drf)	1	10	k.A.	10	10	k.A.
drf min/maxwait time	s	default/3600	k.A.	default/3600	default/3600	k.A.
simstep	1	default	k.A.	default	default	k.A.
Anzahl Fahrzeuge	1	15	29	15	15	25
Buchungen	/3h	360	360	360	360	360
abgelehnte Buchungen	1	15	0	15	11	0
ausgeführte Fahrten	1	336	351	337	341	352
Vorbuchungszeit	min	11,857	2,948	13,040	12,711	4,646
zurückgelegte Strecke (Durchschnitt)	km	9,255	4,949	9,256	9,744	4,994
Reisezeit (Durchschnitt)	min	13,268	5,646	13,884	14,576	5,866
Fahrzeugkilometer (Gesamt)	km	1207,631	2397,345	1232,492	1229,629	2806,459
Kilometer pro Fahrzeug (Durchschnitt)	km	80,509	82,667	82,166	81,975	112,258
Fahrzeugkilometer leer	km	101,335	660,316	119,964	101,931	1048,628
betriebliche Effizienz (Strecke)	1	2,575		2,531	2,702	
Systemeffizienz (Strecke)	1	1,438		1,426	1,430	
Umfwegfaktor Durchschnitt (Strecke)	1	1,790		1,775	1,890	
Systemeffizienz (Zeit)	1	1,293		1,238	1,227	
Leerkilometeranteil an Gesamtkilometern	1	8,391		9,733	8,290	
Umfwegfaktor (Zeit)	1	2,249		2,266	2,407	

Abbildung 31: Ausgabe der Simulationsergebnisse von SZ14

Vorbuchungszeit:

Die Vorbuchungszeit ist in SUMO die Zeit, welche die Person warten muss, bis das Fahrzeug sie erreicht. In der Realität bucht der Fahrgast die gewünschte Reise von einem beliebigen Ort und begibt sich passend zur angegebenen Abholzeit zur Haltestelle.

Eine hohe Vorbuchungszeit hängt mit einer höheren Auslastung bzw. einem höheren Belegungsgrad zusammen, da der Dispositionsalgorithmus mehr Reisende zur Verfügung hat, um effiziente Fahrzeugbündelungen zu planen.

In Salzgitter-Bad bewegen sich die Vorbuchungszeiten im Bereich zwischen 12 und 15 Minuten (Abbildung 32: Vorbuchungszeit bei konstanter Fahrzeuganzahl). Bei leicht erhöhter Nachfrage erhöht sich die Vorbuchungszeit ebenfalls leicht. Fahrgäste können die Reisen theoretisch bis 15 min vor der gewünschten Zeit abschließen. So kann die Vorbuchungszeit ansteigen, ohne eine geringere Angebotsqualität für den Fahrgast zu erbringen.

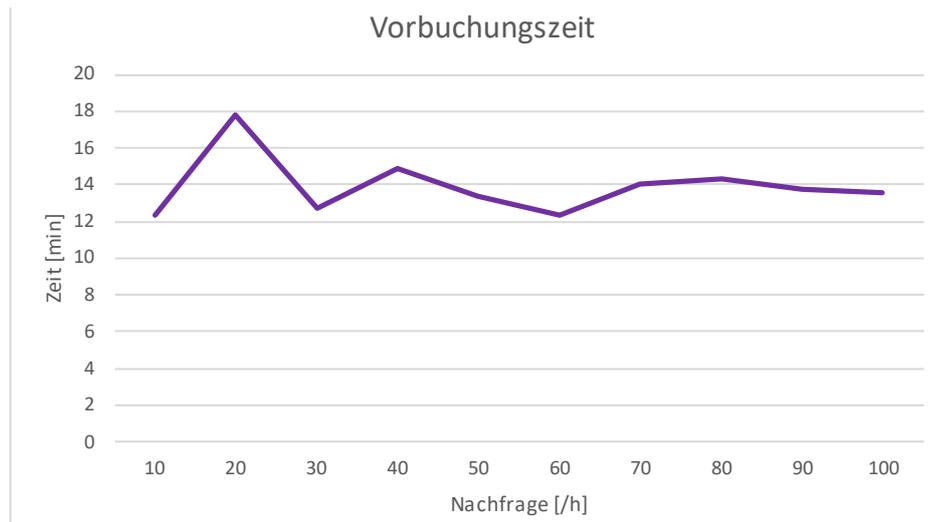


Abbildung 32: Vorbuchungszeit bei konstanter Fahrzeuganzahl

Die Erfahrung aus den Simulationen zeigt: Steigt die Nachfrage, muss ein Fahrzeug hinzugefügt werden, um die Dienstleistung weiter zufriedenstellend, d.h. mit hohem Belegungsgrad und geringem Umwegfaktor, erbringen zu können. Bei hoher Nachfrage ist das Bündeln erfolgreicher. Dabei spielt auch die Umgebung, wie die Distanzen zwischen den Ortschaften und Geschwindigkeiten auf den Fahrstrecken eine Rolle, inwiefern sich die Fahrzeuganzahl erhöhen muss.

Kapitelfazit Salzgitter-Bad:

- Es wird ein maximaler drf von 10 benötigt, damit ausreichend Fahrten gebündelt werden, um hohe Systemeffizienzen erreichen zu können
- Ab einer Nachfrage von 30 Personen pro Stunde ist die Systemeffizienz (Strecke) konstant über 1,0; dabei werden mindestens 3 Fahrzeuge benötigt
- Die maximale Systemeffizienz (Strecke) von 1,43 konnte bei einer Nachfrage von 120 Buchungen pro Stunde, einer Fahrzeuganzahl von 11 (nach Abzug der festgefahrenen Fahrzeuge) und einem maximalen drf von 10 erreicht werden. Dabei lag die durchschnittliche Reisezeit bei rund 14,6 min und die Vorbuchungszeit bei circa 12,7 min. Der Umwegfaktor lag im Durchschnitt bei 1,89, wobei 18,2 % der Fahrten einen Umweg über 3 hatten und 5,4 % Fahrten einen Anteil über 5. Der Leerkilometeranteil befindet sich bei 8,2 %.
- Haltestellen, die in Straßen mit geringer Geschwindigkeit liegen, erhöhen den zeitlichen Umwegfaktor besonders stark (circa 2 min pro Fahrgast)

5.2 Darstellung und Interpretation der Sensitivitäten: Baddeckenstedt/Hoheneggelsen

Fahrzeuganzahl und Nachfrage:

Durch die großen Entfernungen der Ortschaften untereinander und dem flächenmäßig sehr großen flexo- und Simulationsraum von Hoheneggelsen bis Baddeckenstedt bietet der Raum andere Voraussetzungen als der erste Simulationsraum in Salzgitter-Bad. Die Frage hinsichtlich der Sensitivität zwischen Nachfrage und Fahrzeuganzahl und damit die Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit und mögliche Auslastung des Systems kann jedoch ebenfalls durch die verschiedenen Simulationsszenarien beantwortet werden. Dazu wird analysiert, wie sich verschiedene KPI verhalten, wenn sowohl die Nachfrage als auch die Fahrzeuganzahl verändert wird. Bei geringer Nachfrage sind KPI wie Reisezeit und Länge der Trips (Reisestrecke) oder die Systemeffizienz bei geringer Fahrzeuganzahl am besten. Bei einer Nachfrage von **10 Buchungen** in einer Stunde und **2 eingesetzten Fahrzeugen** ist die Reisezeit mit 13,46 min, die Systemeffizienz von aufgerundet 1,0 und der Umwegfaktor mit 1,36 im Vergleich zu **5 Fahrzeugen** und einer Reisezeit von 14,51 min, einer Systemeffizienz von 1,0 und einem Umwegfaktor von 1,48 geringer. Wird die Nachfrage weiter erhöht, müssen auch mehr Fahrzeuge eingesetzt werden. So sind bei einer Nachfrage von 70 Buchungen in der Stunde (HB9) 7 Fahrzeuge besser geeignet als 10 Fahrzeuge, da die Fahrzeuge mehr ausgelastet sind (siehe Abbildung 34: Vergleich HB9). In HB12 sind 10 Fahrzeuge aber besser geeignet als 7 Fahrzeuge, da sonst Fahrten abgelehnt werden müssen.

Die Szenarien lassen sich am besten bei erfolgreicher Bündelung vergleichen. Dann sind die Fahrtzeiten für den Fahrgast akzeptabel und die Sensitivität von Nachfrage und Fahrzeuganzahl auf verschiedene KPI im ländlichen Gebiet wird deutlich. Damit von Szenario zu Szenario mit steigender Nachfrage weiterhin akzeptable und gute (durchschnittliche) Reisezeiten, Umwegfaktoren und absolvierte Buchungen stattfinden und somit die Systemeffizienz und Auslastung möglichst hoch bleibt, steigt die Anzahl einzusetzender Fahrzeuge schnell an.

Deutlich wird der starke Anstieg der Fahrzeuganzahl in grafischer Darstellung.

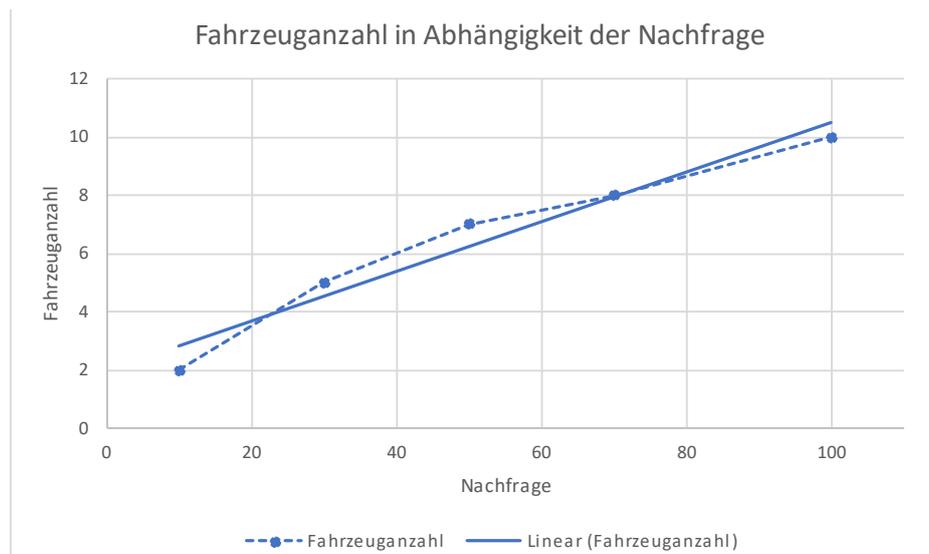


Abbildung 33: Grafische Abbildung der Sensitivität von Fahrzeuganzahl und Nachfrage

Die Grenzen im Verhältnis von Fahrzeuganzahl und Nachfrage können zudem durch zwei weitere „Ansichten“ beschrieben werden.

Zunächst werden verschiedene Simulationen in **einem Szenario mit fester Nachfrage** durchgeführt. Um das Verhältnis zwischen Nachfrage und Fahrzeuganzahl zu erläutern, wurden die Fahrzeuganzahlen so lange reduziert, bis die ersten Fahrten abgelehnt wurden, damit die Ergebnisse durch abgelehnte Fahrten nicht verfälscht werden. Die Durchläufe wurden mit 15 Fahrzeugen gestartet und konstant um ein Fahrzeug bis 6 Fahrzeuge reduziert.

Der Vergleich zeigt die Auslastung verschiedener Fahrzeuge.

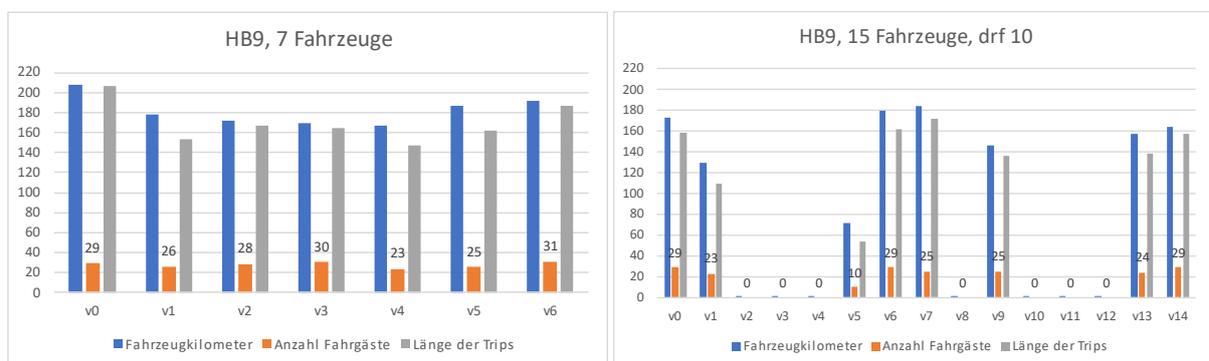


Abbildung 34: Vergleich HB9

Bei lediglich 7 Fahrzeugen sind alle Fahrzeuge „ausgelastet“ und haben eine durchschnittliche Auslastung von 27 Fahrgästen in drei Stunden. Bei einer Fahrzeuganzahl von 15 Fahrzeugen liegt die durchschnittliche Auslastung bei 24 Fahrgästen in drei Stunden. Dabei sind

jedoch 6 Fahrzeuge nicht in Benutzung. Hier versucht der Algorithmus die Fahrten auf so wenig Fahrzeuge wie möglich zu verteilen.

Dieses Phänomen tritt auch bei weiteren Fahrzeuganzahlen auf. Bei nur einem Durchlauf mit einer bestimmten Fahrzeuganzahl sind die Fahrzeuge möglichst ausgelastet. Dies kann das optimale Verhältnis sein.

Wie bei der Modellregion in Salzgitter-Bad lässt sich an den Fahrzeugkilometern, im Vergleich zu Durchläufen mit geänderter Fahrzeuganzahl, erkennen, ob Fahrzeuge durchgehend ausgelastet sind. Erhöht sich dann die Nachfrage, geschieht das auf Kosten der Trips, welche pro Stunde abgefertigt werden können. Werden Fahrten abgelehnt muss die Fahrzeuganzahl erhöht werden, denn mehr Fahrzeuge, die mehr Fahrgäste transportieren, senken die Tripdauer und Länge. Der Leerkilometeranteil steigt jedoch und desto weniger die Fahrzeuge bündeln weniger, umso mehr es gibt. Das Ziel ist es aber, ein zusätzliches Fahrzeug einzusetzen, um für mehr abgeschlossene Fahrten zu sorgen.

Damit alle Fahrzeuge gleich ausgelastet werden, wird der Dispositionsalgorithmus angepasst. Durch das Reduzieren des Direct Route Factors von 10 auf 3 werden vermehrt Fahrzeuge „aktiviert“, indem die Bereitschaft und Fähigkeit zum Bündeln reduziert wird. Dies hat Auswirkungen auf die betriebliche Effizienz, Systemeffizienz und den Umwegfaktor. Die Werte sinken jeweils, da nun mehr Fahrzeuge benutzt werden. Auch die durchschnittliche Auslastung der Fahrzeuge (12,4) sinkt (orangene Balken auf der Abbildung 35: HB9: Alle Fahrzeuge in Betrieb).

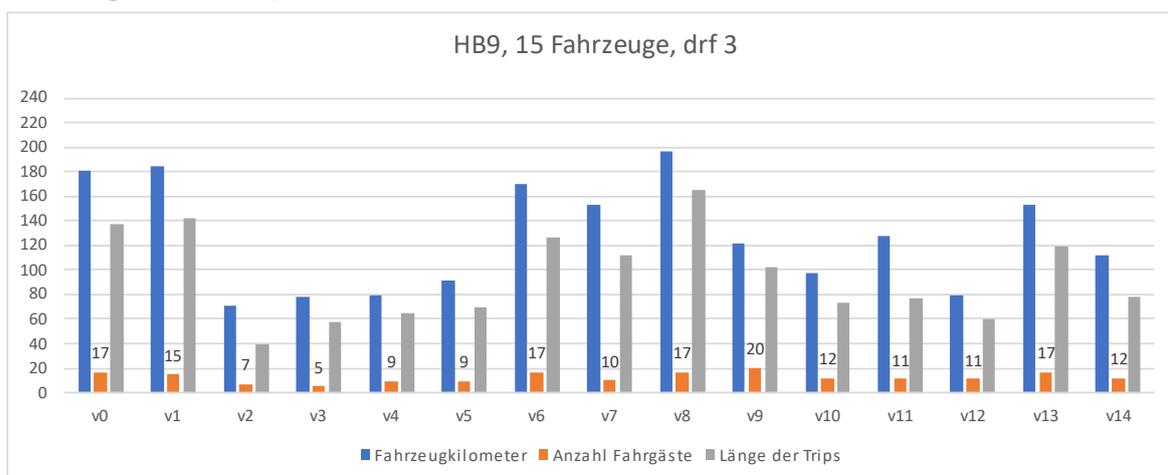


Abbildung 35: HB9: Alle Fahrzeuge in Betrieb

Effizienzen:

Gleichzeitig wurde die Systemeffizienz, die betriebliche Effizienz und der Umwegfaktor ausgewertet.

In der zweiten Modellregion sind Systemeffizienz und betriebliche Effizienz ebenfalls durch das Nutzen-Aufwand Verhältnis bestimmter Fahrten definiert. Die betriebliche Effizienz greift auf die gefahrenen Personenkilometer zurück, während die Systemeffizienz spezifischer auf die gebuchten Personenkilometer eingeht und damit noch größer im Interesse der Fahrgäste steht. Diese Effizienzen stehen im Zusammenhang mit der Nachfrage und den damit verbundenen „optimalen“ Fahrzeuganzahlen, welche ein Szenario bilden. Wird sich einer „optimalen“ Zusammensetzung zwischen Nachfrage und Fahrzeuganzahl angenähert, so steigen die betriebliche Effizienz und die Systemeffizienz. Der Umwegfaktor, also der Unterschied der beiden Effizienzen, wird bei geringer Fahrzeuganzahl immer größer, da ein Fahrzeug unter anderem weitere Distanzen zwischen den Buchungen zum Bündeln zurücklegen muss. Das hat auch Einfluss auf die betriebliche Effizienz. Auch in Baddeckenstedt/Hoheneggelsen bleibt die Systemeffizienz unabhängig vom Umwegfaktor. Dieser bleibt durch den angepassten drf bei höherer Fahrzeuganzahl konstant.

Der Graph des Szenarios HB9 zeigt, dass die betriebliche Effizienz und Systemeffizienz mit sinkender Fahrzeuganzahl ansteigen.

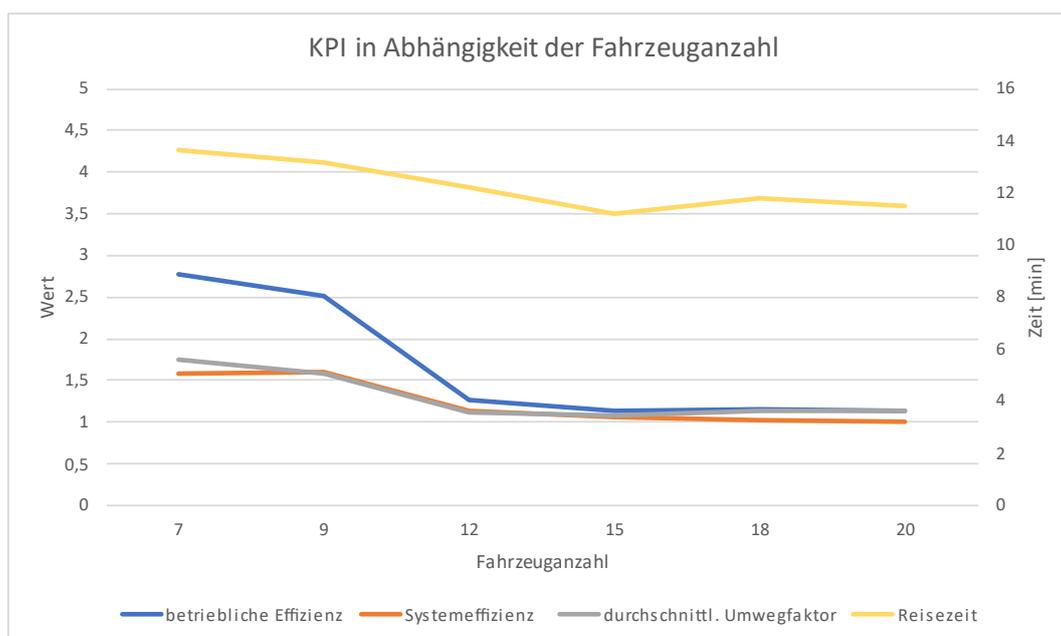


Abbildung 36: Sensitivitäten der Fahrzeuganzahl in HB9

Bei einem „optimalen“ Verhältnis zwischen Nachfrage und Fahrzeuganzahl ist die System- und betriebliche Effizienz an ihrem Maximum. Dies ist hier bei 7 Fahrzeugen der Fall. Bei 6 oder weniger Fahrzeugen wären diese mit der Nachfrage überfordert. Auch KPI, wie die Reisezeit, weisen deutliche Unterschiede von Durchlauf zu Durchlauf in einem Szenario auf. Die durchschnittliche Reisezeit sinkt geringfügig mit steigender Fahrzeuganzahl. Bei 15 Fahrzeugen hat die Reisezeit ein Minimum mit circa 12 min im Durchschnitt. Hier ist eine Sensitivität zum Drf zu identifizieren. Würde dieser sinken, wird der maximale Umweg der Fahrzeuge eingeschränkt, es werden mehr Fahrzeuge „aktiviert“ und die Reisezeiten pro Fahrgast sinken.

Auch legt ein einzelnes Fahrzeug im Durchschnitt weniger Kilometer insgesamt zurück, wenn die Fahrzeuganzahl steigt. Dies beträgt circa 180 km insgesamt bei „nur“ 7 Fahrzeugen, weniger als 130 km bei 15 und circa 100 km bei 20 Fahrzeugen. Werden noch mehr Fahrzeuge hinzugefügt, wird die Anzahl an Fahrten bei denen gebündelt wird, immer geringer, da jede Buchung ab einem bestimmten Zeitpunkt mit einem (anderem) Fahrzeug absolviert werden kann. Reisezeit und Länge der Trips sinken durch die direkten Wege von Start- zu Zielpunkt. Ebenso sinken die Systemeffizienz und betriebliche Effizienz. Dabei ist weiterhin zu beachten, dass die gewonnenen Werte aus der Simulation eine geringe Fehlerquote aufweisen können. Durch Ungenauigkeiten, Zufallsvariablen und Rundungsfehler beim Auswertungstool sind Abweichungen nicht auszuschließen.

Auf der anderen Seite wird die System- und betriebliche Effizienz szenarioübergreifend, d.h. in Abhängigkeit sich **verändernder Nachfrage bei gleicher Fahrzeuganzahl**, betrachtet.

Bei einer Fahrzeuganzahl von 10 Fahrzeugen in Hoheneggelsen/Baddeckenstedt ist die Grenze der betrieblichen Effizienz bei einer Nachfrage von 100 Buchungen erreicht.

Während die betriebliche Effizienz ein beschränktes Wachstum aufweist und sich bei steigender Nachfrage einem Wert von 3,0 annähert, steigt die Systemeffizienz linear an, denn diese beinhaltet nicht den Umwegfaktor, welcher zunächst ebenfalls einen leichten Anstieg zu verzeichnen hat, bei hoher Nachfrage aber konstant bleibt (Abbildung 37: Effizienzen, Umwegfaktor und Reisezeit bei konstanter Fahrzeuganzahl im Überblick).

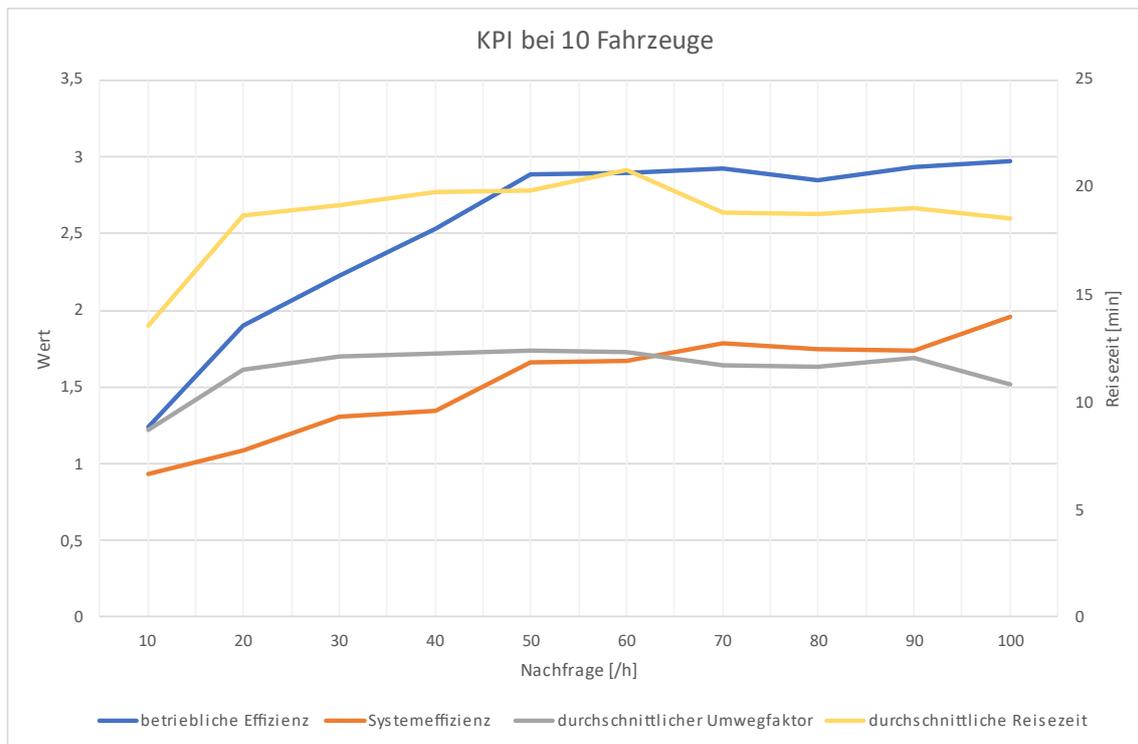


Abbildung 37: Effizienzen, Umwegfaktor und Reisezeit bei konstanter Fahrzeuganzahl im Überblick

Die durchschnittliche Reisezeit eines Fahrgastes ist mit 13,5 min bei geringer Nachfrage am niedrigsten, die System- und betriebliche Effizienz allerdings auch. Das liegt daran, dass die Fahrzeuganzahl (10) für 10 Buchungen in der Stunde mehr als ausreichend ist. Danach steigt die Reisezeit auf über 20 min an, bis sie bei „optimaler“ betrieblicher Effizienz auf einen vergleichsweise geringen Wert von 18,5 min abfällt. Über die gesamten Durchläufe bleibt sie konstant. Erst ab einer bestimmten Nachfrage von 30, besser 40 Buchungen pro Stunde, wird eine hohe betriebliche Effizienz und eine annähernd gute Systemeffizienz erreicht.

Bei den gegebenen Parametern, wie diesem Dispositionsalgorithmus (mit drf10, maxwait 3600) und einer festen Fahrzeuganzahl von 10 Fahrzeugen, steigt die betriebliche Effizienz nicht **höher als 3,0**. Wird die Nachfrage weiter gesteigert (HB13), reichen 10 Fahrzeuge nicht mehr aus und Buchungen von Fahrgästen würden abgelehnt werden. Die Systemeffi-

zienz (+0,2225) und die betriebliche Effizienz (+0,0387) steigen im Szenario HB12, im Vergleich zu HB11.2, weiterhin an, da Fahrgäste in vorhandene Fahrzeuge einsteigen können und somit nur die Bündelungsrate steigt, der Umweg aber nicht. Zu erkennen ist das an den Fahrkilometern. Diese steigen von durchschnittlich 143,32 Kilometer pro Fahrzeug im Szenario HB11.2 auf durchschnittlich 149,76 Kilometer pro Fahrzeug im Szenario HB12 nur leicht an, während die Fahrzeuge zusätzliche Personen transportieren. Zu erkennen ist dies auch im grafischen Vergleich der beiden Szenarien.

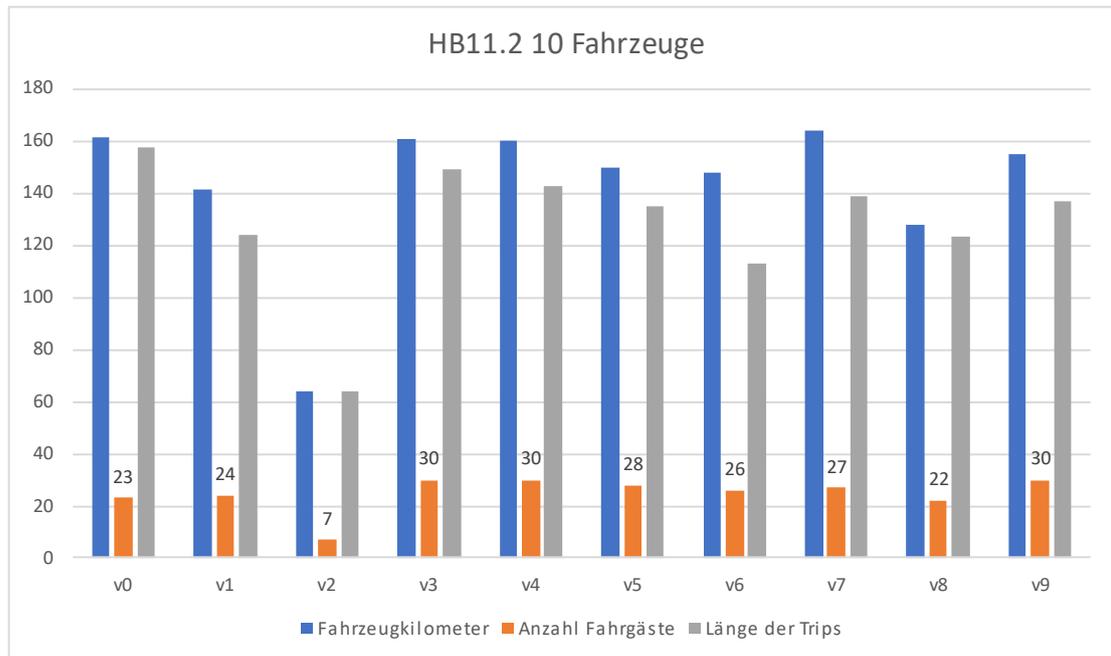


Abbildung 38: HB11.2: Fahrzeugkilometer, Anzahl Fahrgäste und Triplänge

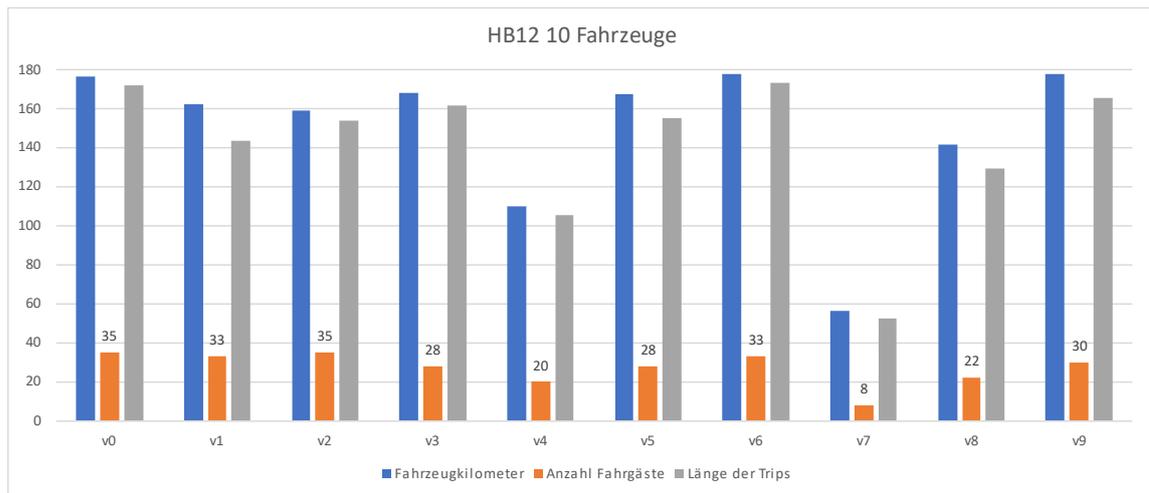


Abbildung 39: HB12: Fahrzeugkilometer, Anzahl Fahrgäste und Triplänge

Die Balkendiagramme von HB11.2 und HB12 zeigen die Fahrzeugkilometer, die Anzahl Fahrgäste und die Länge der Trips bei gleicher Fahrzeuganzahl. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Fahrzeuge bei zehn zusätzlichen Trips pro Stunde auch mehr Kilometer fahren. So werden die zehn Trips fast konstant auf die Fahrzeuge verteilt. Dies zeigt, dass bei HB11.2 noch Potenzial besteht, bevor nach einer erneuten Nachfrageresteigerung von HB12 nach HB13 Fahrten abgelehnt werden.

Umwegfaktor:

Der Umwegfaktor ist in Hoheneggelsen/Baddeckenstedt ebenfalls ein wichtiger Indikator zur Analyse des On-Demand Systems. Auch hier ist dieser bei den Szenarien, welche durch eine Sensitivität zwischen Nachfrage und Anzahl Fahrzeuge als „optimal“ eingestuft sind und damit die maximale Systemeffizienz erreicht ist, mit 1,52 im Durchschnitt gering. Bei einer niedrigen Nachfrage steigt der Umwegfaktor jedoch an, da die Optionen, d.h. alternative Buchungen zum Bündeln, nicht vorhanden sind. Des Weiteren müssen einige Fahrgäste einen Umweg bis zu 300 % des direkten Weges in Kauf nehmen. Insgesamt ist zu erkennen, dass der Umwegfaktor bei 10 Fahrzeugen zwischen 1,21 (HB2) und 1,74 (HB7) schwankt.

In der Grafik ist die Verteilung der Umwege von bis zu 300 Buchungen abgebildet.

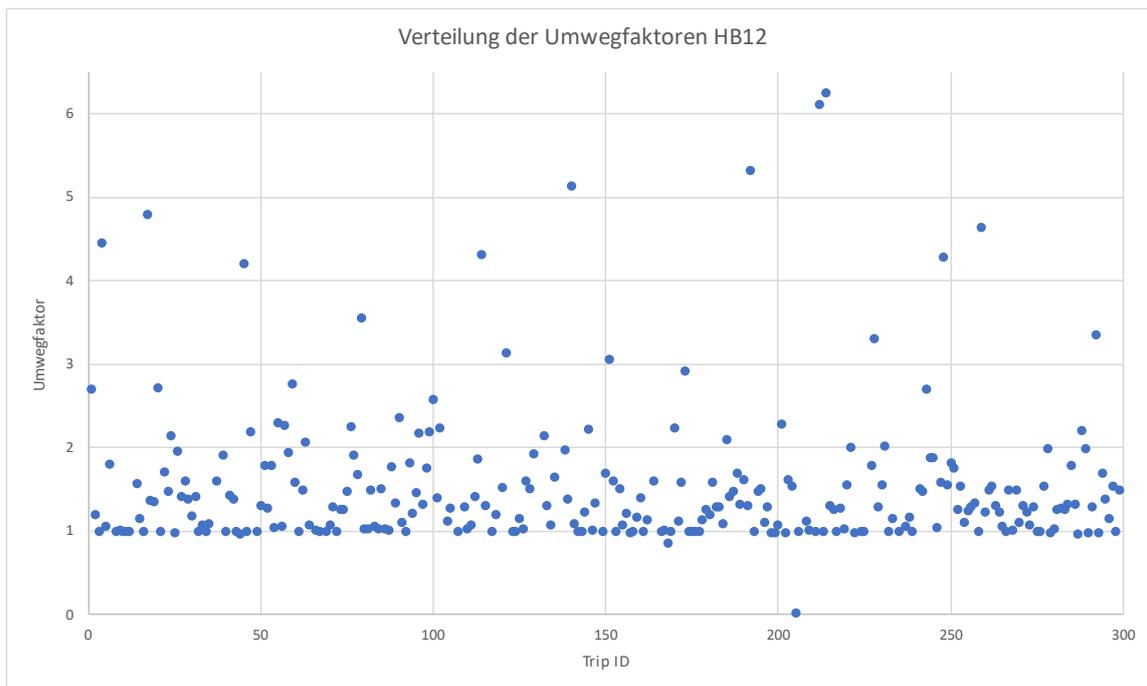


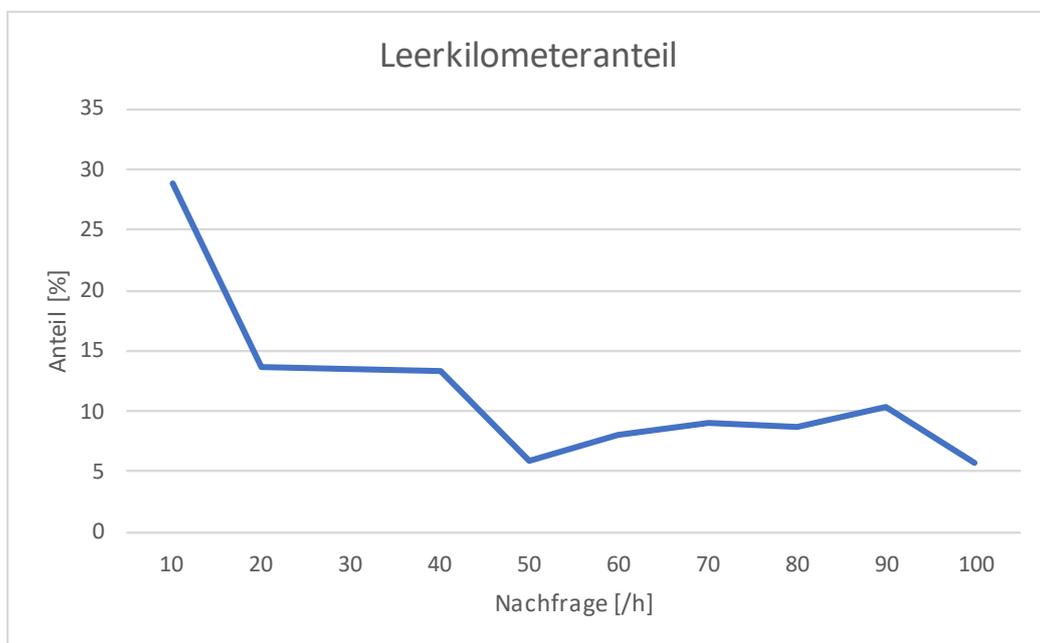
Abbildung 40: Verteilung der Umwegfaktoren bei 300 Trips

Im Szenario HB12 sind 100 Fahrzeuge über drei Stunden simuliert worden. Ein Großteil der Fahrten (240) hat einen geringen Umwegfaktor von maximal dem Zweifachen der direkten Fahrt. 36 von 275 (13 %) haben Umwege von mehr als des Doppelten der direkten Fahrt in Kauf zu nehmen.

Bei steigender Anzahl der Fahrzeuge verbessert sich der Umwegfaktor, allerdings zu Lasten anderer Indikatoren wie Leerkilometer oder Systemeffizienz. Dadurch, dass der Großteil (87 %) der Fahrgäste keinen großen Umweg zu fahren hat, könnten diese mit ihrer Reisezeit und Streckenlänge zufrieden sein. Die Fahrgäste, welche jedoch einen überdurchschnittlichen Umweg akzeptieren müssen, lehnen diesen womöglich ab. Hier ist die Grenze des Umwegfaktors zu setzen.

Leerkilometer:

In Hoheneggelsen/Baddeckenstedt sind die Leerkilometer ein Indikator dafür, wie oft und wie weit ein On-Demand Fahrzeug ohne Fahrgast unterwegs ist. Durch die großen Entfernungen der Ortschaften untereinander und damit zwischen den Haltestellen, an welchen Fahrgäste zusteigen, sind die Leerkilometer bei geringer Nachfrage und zu vielen Fahrzeugen für diese (10 Fahrzeuge) hoch. Erhöht sich die Nachfrage, sinken die Leerkilometer. Dann sind vermehrt Fahrgäste in der Region verteilt und ein Fahrzeug muss keine langen Strecken zum nächsten Fahrgast zurücklegen. Bis zu einer Nachfrage von 100 Buchungen pro Stunde (Szenario HB12) liegt der Leerkilometeranteil bei durchschnittlich 11,69 % (Abbildung 41: Anteil Leerkilometer an den Gesamtkilometern).

**Abbildung 41: Anteil Leerkilometer an den Gesamtkilometern**

Haltestellendichte:

Die Haltestellendichte im ländlich geprägten Raum ist gering. Durch zusätzliche flexo-Stopps ist garantiert, dass in jeder Ortschaft mindestens drei Haltestellen in unmittelbarer Umgebung zu bewohnten Gebieten angefahren werden. Die Fahrgäste haben dadurch einen geringen Fußweg zu einem flexo-Stopp. In den Simulationen sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Szenarien zu identifizieren. Während einige Fahrgäste einen überdurchschnittlichen Fußweg zurücklegen müssen, hat der Großteil der Fahrgäste einen geringen Fußweg von 110 bis 150 Metern zur Starthaltestelle und zum Zielpunkt des Trips.

Vorbuchungszeit:

Wie im Kapitel zuvor angegeben ist die Vorbuchungszeit in SUMO die Zeit, welche die Person warten muss, damit das Fahrzeug diese erreicht (Wartezeit). In Realität ist das jedoch anders. Der Fahrgast bucht die gewünschte Reise von einem beliebigen Ort und begibt sich entsprechend der angegebenen Abholzeit zur Haltestelle. Eine hohe Vorbuchungs- und damit Wartezeit kann zu höherer Auslastung bzw. einem höheren Belegungsgrad führen, da ein DRT Fahrzeug mehr Zeit hat und mit anderen Fahrgästen bündeln kann. Jede Veränderung der Nachfrage hat auch einen Einfluss auf die Vorbuchungszeit. Der folgende Verlauf der Vorbuchungszeit unterscheidet sich von dem am Anfang von Kapitel 5. Hier bleibt der Df konstant bei 10. In der Modellregion zwischen Hoheneggelsen und Baddeckenstedt sind die Vorbuchungszeiten bei sich verändernder Fahrzeuganzahl im Bereich zwischen circa 8 und 16 min (Abbildung 42: Vorbuchungszeit bei konstanter Fahrzeuganzahl).

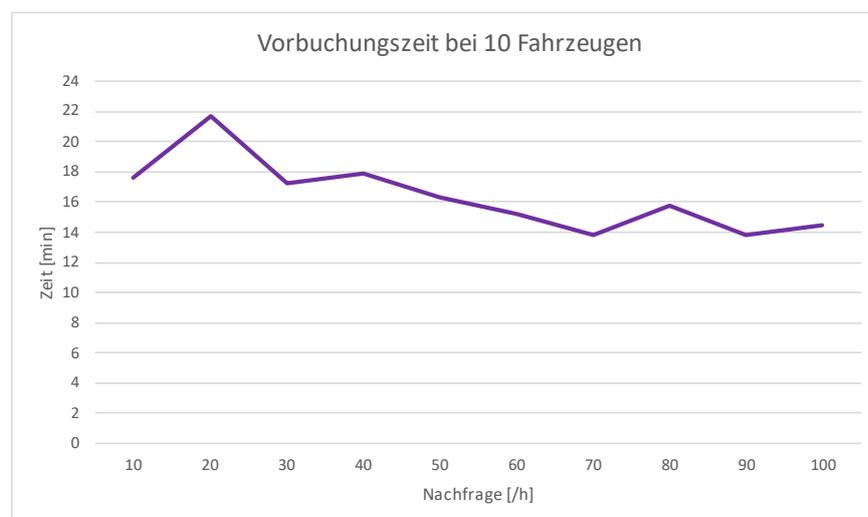


Abbildung 42: Vorbuchungszeit bei konstanter Fahrzeuganzahl

Bei sich erhöhender Nachfrage und konstanter Fahrzeuganzahl (10, HB9) sinkt die Vorbuchungszeit von circa 18 min (HB2) auf 14 min (HB12). Durch die höhere Nachfrage ist die Anzahl an Fahräten, die gebündelt werden, höher und die Fahrzeuge benötigen weniger Zeit, um die Fahrgäste einzusammeln. Zudem werden bei geringer Nachfrage nicht alle Fahrzeuge genutzt und bei hoher Nachfrage sind die Fahrzeuge im Gebiet besser verteilt und haben eine kürzere Distanz zum nächsten Fahrgast. Fahrgäste können die Reise theoretisch bis 18 min vor der gewünschten Zeit abschließen, da die Vorbuchungszeit in SUMO die Wartezeit für den Fahrgast angibt. Die Vorbuchungszeit kann ansteigen, ohne eine geringere Angebotsqualität für den Fahrgast zu erbringen, da das On-Demand System dem Nutzenden eine Zeit angeben kann, bei welcher ein Fahrzeug eintrifft.

Die Simulationen in Hoheneggelsen/Baddeckenstedt zeigen: Die charakteristischen Merkmale einer ländlichen Region beeinflussen auch die KPI eines On-Demand Systems. Durch große Entfernungen zwischen Ortschaften und den weit verteilten Fahrgästen steigt die Fahrzeuganzahl bei steigender Nachfrage schnell an, sodass gute Effizienzen erst ab hoher Nachfrage erreicht werden.

Kapitelfazit Hoheneggelsen/Baddeckenstedt:

- Bei einem maximal benötigtem Drf von 10 werden ausreichend Fahrten gebündelt werden, um hohe Systemeffizienzen erreichen zu können
- Ab einer Nachfrage von 30- 40 Personen pro Stunde ist die Systemeffizienz (Strecke) konstant über 1,0; dabei werden mindestens 5 Fahrzeuge benötigt
- Die maximale Systemeffizienz (Strecke) von 1,96 konnte bei einer Nachfrage von 100 Buchungen pro Stunde, einer Fahrzeuganzahl von 10 und einem maximalen drf von 10 erreicht werden. Die durchschnittliche Reisezeit liegt bei rund 18,5 min und die Vorbuchungszeit bei circa 14,4 min. Im Durchschnitt liegt der Umwegfaktor bei 1,51. 5,5 % der Fahrten haben einen Umweg über 3 und 1,5 % Fahrten einen Anteil über 5. Der Leerkilometeranteil befindet sich bei 5,7 %.

5.3 Vergleich der Modellregionen untereinander und allgemeine Schlüsse

Beide Modellregionen sind in ihrem Raum durch typische Merkmale geprägt. Erst der Vergleich der grafischen Abbildungen von den Sensitivitäten untereinander zeigt die Auswirkungen des stark ländlich geprägten Raumes.

Während die Nachfrage gleich bleibt, steigt die **benötigte Anzahl an Fahrzeuge** im ländlichen Raum stärker an. Während in der Region Hoheneggelsen/Baddeckenstedt bei einer Nachfrage von 50 Buchungen pro Stunde 7 Fahrzeuge (noch) ausreichen, müssen in der Modellregion Salzgitter-Bad nur 5 Fahrzeuge unterwegs sein. Dieses Phänomen nimmt, durch die Möglichkeit stärker zu bündeln, mit steigender Nachfrage ab. Bei 70 Buchungen pro Stunde müssen mindestens 8 Fahrzeuge in Baddeckenstedt in Benutzung sein, wobei sehr gute Effizienzen erst bei 10 Fahrzeugen erreicht werden. In Salzgitter-Bad reichen ebenfalls 7 Fahrzeuge aus. Die höchsten Effizienzen werden aber bei 8 Fahrzeugen erreicht. Bei einer höheren Nachfrage von 100 Buchungen pro Stunde sind in der „städtisch geprägten“ Region in Salzgitter rund 10 Fahrzeuge unterwegs. Auch 120 Buchungen pro Stunde sind mit 10 Fahrzeuge in Salzgitter-Bad zu bewältigen. Im ländlichen Raum wird dabei die Fahrzeuganzahl auf mindestens 10-12 Fahrzeuge erhöht, während 10 Fahrzeuge in Salzgitter-Bad eine Nachfrage von circa 120 Buchungen pro Stunde befriedigen können. Bei steigender Nachfrage wird die Differenz vom Verhältnis von benötigter Fahrzeuganzahl zu Nachfrage der beiden Modellregionen immer geringer.

In beiden Modellregionen steigen sowohl die **betriebliche Effizienz** als auch die **Systemeffizienz** ab einer Nachfrage von mindestens 30- 40 Buchungen pro Stunde. Danach steigen die Effizienzen nicht mehr stark an und nähern sich mit steigender Nachfrage langsam einem Maximum an (beschränktes Wachstum). Die Systemeffizienz ist in Hoheneggelsen/Baddeckenstedt besser (HB \varnothing 1,22; SZ \varnothing 1,52) und ist in der Differenz weniger stark wie die betriebliche Effizienz (HB \varnothing 2,36; SZ \varnothing 2,49). Dies kann daran liegen, dass bei gegebener Nachfrage die Startpunkte der zu bündelnden Fahrgäste günstiger auf der Fahrtroute in eine Richtung liegen und ein geringerer Umweg gefahren werden muss. Zudem wird aus den Umwegen in Salzgitter-Bad deutlich, dass diese vermehrt in Wohngebieten mit verkehrsberuhigten Bereichen gefahren werden. Dort ist der Verlust an Zeit und Strecke besonders hoch.

Der Weg zur Starthaltestelle und dem Zielpunkt des Trips unterscheidet sich in beiden Modellregionen nicht stark voneinander. Dies liegt an der **Entfernung zur nächstliegenden Haltestelle**, welche durch das Hinzufügen von zusätzlichen flexo-Stopps gering ist. In beiden Regionen beträgt der Weg, welcher nicht mit einem DRT- Fahrzeug zurückgelegt wird, 100 bis 150 Meter. Diese hohe Haltestellendichte ist für die Reisenden in Salzgitter-Bad jedoch problematisch. Dadurch, dass einige Haltestellen, vor allem im südöstlichen und südwestlichen Teil von Salzgitter-Bad, in Wohngebieten mit verkehrsberuhigten Bereichen oder in 30er-Zonen liegen, „verlieren“ die DRT-Fahrzeuge und damit auch die Fahrgäste viel Zeit im Vergleich zum ländlichen Raum. Deutlich wird das an den durchschnittlichen Reisezeiten der Trips. Diese sind bei gebündelten Fahrten um das Dreifache höher als diese der direkten Wege. In Hoheneggelsen/Baddeckenstedt liegen verschiedene kleine Ortschaften. Die Haltestellendichte ist viel geringer, allerdings ist der Weg eines Fahrgastes bis zur Starthaltestellen durch die kleinen Ortschaften (geringe Wohnfläche, zusätzliche flexo- Stops) gering. Bei höherer Nachfrage hat die Haltestellendichte einen geringeren Einfluss. Dies zeigt eine Simulation mit veränderter Haltestellendichte im Szenario SZ14 (siehe auch Abbildung 31: Ausgabe der Simulationsergebnisse von SZ14).

Die **Leerkilometer**, die ein Fahrzeug in Salzgitter-Bad zurücklegen muss, unterscheiden sich von denen, die im ländlichen Raum gefahren wurden. In Hoheneggelsen/Baddeckenstedt werden die hohen Entfernungen, welche die DRT- Fahrzeuge im ländlichen Gebiet auf dem Weg zum nächsten Fahrgast zurücklegen müssen, bei geringer Nachfrage durch das Verhältnis von Fahrzeuganzahl zu Nachfrage ausgeglichen. Macht es für ein Fahrzeug durch die hohen Entfernungen keinen Sinn (oder durch den Drf eingeschränkt) den Fahrgast abzuholen, muss ein weiteres Fahrzeug für diesen Fahrgast eingesetzt werden und das Verhältnis von Fahrzeuganzahl zu Nachfrage verändert sich. Der Leerkilometeranteil in Hoheneggelsen/Baddeckenstedt liegt mit 11,69 % im Vergleich zu Salzgitter-Bad mit 10,5 % folglich höher.

Durch die großen Entfernungen in Hoheneggelsen/Baddeckenstedt ist die **Vorbuchungszeit** dort deutlich höher als im städtischen Raum Salzgitter-Bad. Dies fällt beim Vergleich der beiden Graphen auf (Abbildung 42: Vorbuchungszeit bei konstanter Fahrzeuganzahl, Abbildung 32: Vorbuchungszeit bei konstanter Fahrzeuganzahl). Während in Salzgitter-Bad Zeiten zwischen 12 und 18 min erreicht werden, müssen Fahrgäste in Hoheneggelsen/Bad-

deckenstedt zwischen 14 und 22 min warten. Im ländlichen Raum sinkt die Vorbuchungszeit mit steigender Nachfrage, wohingegen sie in Salzgitter-Bad konstant bleibt. Auch dies liegt an den hohen Entfernungen zwischen den Ortschaften.

Der Umwegfaktor ist stark vom Dispositionsalgorithmus des Dienstleisters abhängig. Sowohl in Hoheneggelsen/Baddeckenstedt als auch in Salzgitter-Bad schwankt der Umwegfaktor bei gleichbleibenden Fahrzeuganzahlen, bleibt im Endeffekt jedoch konstant. Bei steigender Anzahl an Fahrzeugen verbessert bzw. sinkt der **Umwegfaktor** in beiden Modellregionen leicht, allerdings auf Kosten anderer Indikatoren wie Leerkilometer oder Belegungsgrad. Eine allgemeine Grenze des zu akzeptierenden Umweges ist für jeden Fahrgast individuell und von deren Interessen und Zielen abhängig. Dadurch, dass sich der Umwegfaktor (Strecke) in den Modellregionen stark voneinander unterscheiden (HB \varnothing 1,6, SZ \varnothing 1,92), weichen auch die betrieblichen Effizienzen ab. Der Anteil an Fahrgästen, welche einen hohen Umweg in Kauf nehmen müssen, ist in Salzgitter-Bad um 12,7 % höher als in Hoheneggelsen/Baddeckenstedt. Es muss beachtet werden, dass bei einer steigenden betrieblichen Effizienz auch ein steigender Umwegfaktor zugrunde liegen kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend wird eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse aus den Simulationen, der Analyse und der Erfahrungen während der Arbeit erfolgen. Des Weiteren werden Probleme erläutert, Potenziale von simulationsgestützten Sensitivitätsanalysen im On-Demand Verkehr aufgezeigt und ein Ausblick gegeben, wie das Thema in Zukunft weiter untersucht werden kann.

6.1 Zusammenfassung

Zusammenfassend werden die Grenzen durch die Angebotsqualität bestimmt und durch die Nachfrage beeinflusst oder andersherum. Folgende Werte wurden in der Analyse ermittelt:

	Grenzen: Maximal, mindestens oder Durchschnitt	
Key-Performance-Indikatoren	Salzgitter-Bad	Hoheneggelsen/Baddeckenstedt
Fahrzeuganzahl (Szenario 9)	mind. 8	mind. 7
Nachfrage/Leistungsfähigkeit (10 Fzg.)	max. 120 (SZ14)	max. 100 (HB12)
Systemeffizienz (Strecke, 10 Fzg.)	max. 1,42 Ø 1,22	max. 1,96 Ø 1,52
Systemeffizienz (Zeit, 10 Fzg.)	max. 1,22 Ø 1,05	max. 1,64 Ø 1,31
Betriebliche Effizienz (10 Fzg.)	max. 2,70 Ø 2,36	max. 2,97 Ø 2,49
Umwegfaktor (Strecke, 10 Fzg.)	max. 2,0 Ø 1,947	max. 1,74 Ø 1,612
Umwegfaktor (Zeit, 10 Fzg.)	max. 2,78 Ø 2,53	max. 2,23 Ø 2,07
Durchschn. Leerkilometeranteil [%]	10,5	11,69
Reisezeit [min]	Ø 16 min	Ø 18,7 min

Tabelle 3: Grenzen der wichtigen KPI

Allgemein ist ein städtisch geprägtes Gebiet für die Reisezeiten von Vorteil, da die Nachfrage nicht über einen flächenmäßig großen Raum verteilt ist. Besonderheiten wie verkehrsberuhigte Bereiche und 30er-Zonen in der Modellregion Salzgitter- Bad können je-

doch Einfluss auf KPI haben. Dies wird am höheren Umwegfaktor und den niedrigen Effizienzen sichtbar. Das bestätigen die Grenzen der KPI in der Tabelle 3: Grenzen der wichtigen KPI.

Im ländlichen Raum kann viel Strecke in kurzer Zeit zurückgelegt werden. Aufgrund dessen und durch Besonderheiten in Salzgitter-Bad verzeichnen die betriebliche Effizienz und Systemeffizienz dort bessere Werte.

Es muss beachtet werden, dass erst ab einer gewissen Nachfrage gute Effizienzen und damit eine hohe Leistungsfähigkeit erreicht werden. Dadurch kann besser gebündelt werden. Hinzukommende Fahrgäste lassen die Effizienzen steigen und der Umwegfaktor konstant bleiben. In nachfrageschwachen, vor allem in ländlichen Räumen kann, dies zum Problem werden. Hier haben der Dienstleister und Regionalverband durch entsprechende Maßnahmen entgegenzusteuern. Die Nachfrage kann durch Werbung und Aufmerksamkeit für das On-Demand System gesteigert werden. Auch kann das Dienstleistungsangebot verbessert oder die Preise gesenkt werden. So wird Attraktivität erhöht. Sollte durch eine geringe Nachfrage ein Fahrzeug nicht genutzt werden, wäre es zum Beispiel für andere Zwecke einsetzbar.

Die Leistungsfähigkeit des On-Demand Systems wird maßgeblich durch die eingesetzten Fahrzeuge und den Dispositionsalgorithmus beeinflusst. So verringert ein geringer Drf den Umweg und die Reisezeiten, jedoch auch die Fahrtenbündelung und es ist schwer eine positive Systemeffizienz (über 1,0) zu erreichen. Mit einer hohen Fahrtenbündelung steigt der durchschnittliche Umwegfaktor und Systemeffizienzen bis zu 2,0 können erreicht werden. Dann haben einige Fahrten jedoch einen so hohen Umwegfaktor, dass Fahrgäste die Fahrt vermutlich nicht antreten würden. Wird die Leistungsfähigkeit eines On-Demand Systems als *gebuchte Personenkilometer pro Zeiteinheit* verstanden wird, so wird eine hohe Leistungsfähigkeit erreicht, wenn möglichst alle Personen(-kilometer) in der vorgegebenen Zeit erfolgreich absolviert wurden. In den Simulationsdurchläufen war dies der Fall, wenn keine oder nur wenige Fahrten abgelehnt wurden. Nach dieser Definition kann die Leistungsfähigkeit eines On-Demand Systems durch Anpassen der Parameter bis auf 100 % steigen.

6.2 Probleme, Ausblick und Potenziale

Probleme:

Im Laufe der Simulation und der Analyse der Ergebnisse tauchten immer wieder Probleme auf. Abgelehnten Fahrten entstanden durch sich festfahrende Fahrzeuge in der Simulation. Diese standen im weiteren Verlauf nicht mehr zur Verfügung. So wurden nicht 100% aller Fahrtenanfragen bedient. Folglich sind mehr Fahrzeuge in die Simulation geschickt worden, sodass die wegfallenden Fahrzeuge ergänzt wurden. Dadurch stieg die Anzahl der Fahrzeuge in diesem Durchlauf. Dies war ein entscheidendes Kriterium für die Auswahl der Simulationsergebnisse.

Der Dispositionsalgorithmus hat entscheidende Auswirkungen auf das Bündeln und die Ergebnisse (Reisezeiten, Umwegfaktor). Durch das Anpassen hinsichtlich der Parameter wurden Sensitivitäten entdeckt und ausgenutzt.

Um Abweichungen und Ungenauigkeiten vorzubeugen, sollte mehrmals mit leicht unterschiedlichen Quelle-Ziel-Verteilungen, leicht veränderten Dispositionsalgorithmen oder geänderten Strukturen im Modellraum simuliert werden. Dies sprengte jedoch den zeitlichen Rahmen. Deutlich werden diese kleinen Unterschiede, welche Auswirkungen auf die Sensitivitäten haben, in der Modellregion Salzgitter-Bad. In einigen Szenarien wurden Durchläufe mit leicht veränderten Quelle-Ziel-Matrizen durchgeführt (gekennzeichnet mit SZX.2). Die Auswirkungen auf die KPI sind deutlich zu erkennen. Hier kann als Ausgleich ein Mittelwert gebildet werden, um Schwankungen vorzubeugen.

Die Grenzen der On-Demand Systeme, welche im Kapitel 5 erläutert wurden, sind in Abhängigkeit von den Parametern entstanden. Diese wurden durch Annahmen im Vorfeld festgelegt. So wurden die Grenzen der Fahrzeuganzahl bei einer ausgewählten Nachfrage ermittelt (in beiden Modellregionen SZ9 mit 70 Buchungen pro Stunde). Die Grenze der Nachfrage war von einer festen Fahrzeuganzahl abhängig (in beiden Modellregionen jeweils 10 Fahrzeuge). Im weiteren Verlauf müsste anschließend für jede Nachfrage die „optimale“ Fahrzeuganzahl ermittelt und die Grenzen der Fahrzeuge bzw. die Auswirkungen der Fahrzeuge auf die KPI bei jedem gewünschten Szenario analysiert werden.

Die hohe Haltestellendichte in Salzgitter-Bad, welche im Kapitel 5.1 und 5.3 ausführlich beschrieben wurde, kann zu Problemen führen, denn gebündelte Fahrgäste müssen durch langsame Geschwindigkeiten mehr Zeit in Kauf nehmen. Hier kann empfohlen werden die

Haltestellen aus verkehrsberuhigten Bereichen und 30er-Zonen zu entfernen, um Reisezeiten zu minimieren.

Darüber hinaus kann der Dienstleister entscheiden, ob und wie viele Fahrzeuge bei einer erwarteten Nachfrage eingesetzt werden sollen. Dadurch können Reisezeiten verringert werden und die Angebotsqualität verbessert sich. Die Systemeffizienz und die betriebliche Effizienz werden folglich sinken, da weniger gebündelt wird.

Potenziale:

In nachfrageschwachen Räumen und überall dort, wo die Systemeffizienz erhöht werden soll, kann in Erwägung gezogen werden, ein Shuttle-Konzept einzuführen, welches von Point-of-Interest (POI) zu Point-of-Interest verkehrt und so überflüssige Wege einspart. Dadurch können die KPI verbessert werden. Als Beispiel dafür wurde die TAZ- Beziehung von „SZ-Bad“ nach „SZ-Bad“ weggelassen. Zudem ist eine Kante am Bahnhof so gewichtet worden, dass die Trips von und nach Salzgitter- Bad dort starten und enden. So wurde ein Shuttle-Verkehr zwischen der Ostfalia Hochschule in Calbecht, dem Bahnhof in Ringelheim und dem Bahnhof in Salzgitter-Bad eingeführt. Die Systemeffizienz steigt unter dieser Annahme auf 1,85. Auch die betriebliche Effizienz erhöht sich auf circa 2,85.

Das Ziel eines On-Demand Verkehrs ist es möglichst viele Personen zu bündeln und den MIV zu entlasten. Dadurch werden Emissionen eingespart. Die in der Simulation erreichten Strecken- und Zeiteinsparungen können als Grundlage dienen, um zum Beispiel CO₂ Emissionen zu berechnen, welche ein On-Demand Verkehr einsparen kann. Durch Langsamfahrbereiche oder örtliche Gegebenheiten werden diese in verschiedenen Modellregionen ebenfalls anders ausfallen.

Weitere Potenziale und Sensitivitäten, die es zu untersuchen gilt, sind der Einfluss der Personenkapazität auf die KPI oder das Ändern des Dispositionsalgorithmus und das Bilden von Mittelwerten. Dadurch können grobe Schwankungen minimiert und Fehlerquellen ausgeschlossen werden.

Ausblick:

Das autonome Fahren ist sowohl als Chance als auch als Risiko zu verstehen. Durch weiter voranschreitende Technik, das nötige Knowhow und den stärkeren Fokus auf den Mobilitätssektor in der Zukunft, können autonome Fahrzeuge auch im On-Demand Verkehr Abhilfe leisten. Werden Hindernisse, wie geringe Geschwindigkeiten bei autonomen Fahrzeugen, die fehlende Sicherheit oder das fehlende Budget überwunden, können wichtige KPI bei autonomen On-Demand Verkehrssystemen verbessert werden. Aktuell sind diese zu gering und deswegen in großem Stil nicht konkurrenzfähig.

Das Zitat des Umweltbundesamts bringt die Thematik auf den Punkt.



Die gesamten Kohlendioxid-Emissionen des Pkw-Verkehrs sind zwischen 1995 und 2019 um 5,1 % angestiegen (...). Die Umwelt- und Klimaentlastung im Personenverkehr kann letztlich nicht allein durch technische Verbesserungen am Fahrzeug erreicht werden. Diese Herausforderung kann nur in Kombination mit Maßnahmen wie einer Erhöhung der Verkehrseffizienz, einer sinkenden Verkehrsnachfrage oder einer veränderten Verkehrsmittelwahl gelöst werden.“

— [Umweltbundesamt 2021](#)

Abbildung 43: Zitat des Umweltbundesamts [11]

Gelingt es jedoch, alternative Verkehrsmittel zu etablieren und die Hindernisse, welche es in der Gesellschaft, Politik und Technologie gibt, zu überwinden, haben On-Demand-Systeme das Potenzial wieder neue Dynamik in die Mobilitätsbedürfnisse der Menschen zu bringen und ihren Teil zur Verkehrswende beizutragen.

Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt, „Klimaschutz im Verkehr,“ 20 05 2022. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/klimaschutz-im-verkehr#undefined>. [Zugriff am 10 06 2022].
- [2] Bundesamt der Justiz, „Gesetz zur Regionalisierung des öffentlichen Personennahverkehrs,“ juris GmbH, o.J.. [Online]. Available: http://www.gesetze-im-internet.de/regg/_2.html. [Zugriff am 13 06 2022].
- [3] Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, „Key Performance Indikator (KPI),“ o.J.. [Online]. Available: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/key-performance-indicator-kpi-52670>. [Zugriff am 21 06 2022].
- [4] D.-. I. (. S. Luber und N. Litzel, „Was ist ein KPI (Key Performance Indikator)?,“ 05 12 2019. [Online]. Available: <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-ein-kpi-key-performance-indicator-a-887319/>. [Zugriff am 21 06 2022].
- [5] 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.
- [6] KW Achshausen, „Netze und Leistungsfähigkeit,“ TH Zürich, 2019.
- [7] J. Gies und V. Langer, „Mit On-Demand-Angeboten ÖPNV-Bedarfsverkehre modernisieren,“ Berlin, 2021.
- [8] Eclipse Foundation, „Simulation of Urban MObility,“ o.J.. [Online]. Available: <https://www.eclipse.org/sumo/>. [Zugriff am 14 06 2022].
- [9] Regionalverband Großraum Braunschweig, „Verbandsgebiet - Regionalverband Großraum Braunschweig,“ o.J.. [Online]. Available: <https://www.regionalverband-braunschweig.de/ueber-uns/gebiet/>. [Zugriff am 16 06 2022].
- [10] Regionalverband Großraum Braunschweig, „Regionalverband Großraum Braunschweig - Unsere Aufgaben,“ o.J.. [Online]. Available: <https://www.regionalverband-braunschweig.de/ueber-uns/aufgaben/>. [Zugriff am 22 06 2022].

- [11] Via Transportation, Inc., „Die Zukunft öffentlicher Mobilität beginnt hier.“ 2022. [Online]. Available: https://info.ridewithvia.com/dach-opnv?utm_content=rsa&utm_source=google_ads&utm_medium=adwords&utm_campaign=DC%20%7C%20Non-Brand%20%7C%20Transit%20%7C%20DACH&utm_term=on-demand%20verkehr&gclid=Cj0KCQjwhqaVBhCxARIsAHK1tiMRGzvVCsCygM8Uw_hZWNg3bGou3ihEq0KS. [Zugriff am 15 06 2022].
- [12] S. Böhler-Baedecker, U. Jansen, C. Schäfer-Sparenberg, A. Kindl, C. Reuter und C. Walter, „Chancen und Risiken flexibler Bedienungsformen im ÖPNV in ländlichen Räumen,“ 2010.
- [13] Land Nordrhein-Westfalen, „Für einen besseren ÖPNV: Landesregierung stärkt On-Demand-Mobilität / Förderbescheide für innovative Projekte übergeben,“ 02 11 2020. [Online]. Available: <https://www.land.nrw/pressemitteilung/fuer-einen-besseren-oepnv-landesregierung-staerkt-demand-mobilitaet>. [Zugriff am 15 06 2022].
- [14] R. Eckermann, „Fördermöglichkeiten von Bedarfs- / on-demand-Verkehren durch das Land Niedersachsen,“ Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Arbeit, Verkehr und Digitalisierung, 2019.
- [15] R. Peters, „LNVG aktuell: PBefg-Novelle,“ 06 11 2020. [Online]. Available: <https://www.lnvg.de/anzeige-newsletter-06-november-2020-1/neues-im-pbefg-zu-on-demand-verkehren-2>. [Zugriff am 15 06 2022].
- [16] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, „Modellprojekte zur Stärkung des ÖPNV" starten in die Umsetzungsphase,“ 28 03 2022. [Online]. Available: <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/OEPNV/Foerderprogramm-Staerkung-OEPNV/foerderprogramm-staerkung-oepnv.html>. [Zugriff am 15 06 2022].
- [17] Regionalverband Großraum Braunschweig, „Einfach FLEXO,“ o.J.. [Online]. Available: <https://www.flexo-bus.de/>. [Zugriff am 18 06 2022].
- [18] Stadtwerke Osnabrück AG, „HUB CHAIN,“ o.J.. [Online]. Available: <https://www.hubchain.de>. [Zugriff am 18 06 2022].

- [19] Padam Mobility, „Öffentlicher Nahverkehr im Vereinigten Königreich: What's next?“, o.J.. [Online]. Available: <https://blog.padam-mobility.com/de/2021/04/02/der-neue-englische-weg-des-oeffentlichen-nahverkehrs/>. [Zugriff am 20 06 2022].
- [20] ioki, „Auf Expansionskurs in Großbritannien: ioki startet Zusammenarbeit mit Arriva UK“, 03 07 2020. [Online]. Available: <https://ioki.com/auf-expansionskurs-in-grossbritannien-ioki-startet-zusammenarbeit-mit-arriva-uk/>. [Zugriff am 20 06 2022].
- [21] T. Koska, „Chancen, Risiken und Effizienzpotenziale durch die Digitalisierung im Verkehr mit Schwerpunkt On-Demand-Angebote“, Wuppertal, März 2021.
- [22] B. Scheier, A. Isberner und E. David, *Bedarfsorientierter ÖPNV im ländlichen Raum - Simulationsstudie und Potentialanalyse*, DLR, 2022.
- [23] B. Scheier, K. Viergutz und B. Frieske, „Chancen und Potenziale von Mobility-as-a-Service nach der Corona-Pandemie“, 2021.
- [24] C. Finke, „Fünf Stufen des automatisierten Fahrens“, 11 02 2021. [Online]. Available: <https://www.autozeitung.de/autonomes-fahren-stufen-level-196428.html>. [Zugriff am 28 06 2022].
- [25] P. D. C. Liebchen, „Ridepooling messbar machen“, TH Wildau, 2021.
- [26] PTV Planung Transport Verkehr GmbH, „Verkehrssimulation Software PTV Vissim“, 2022. [Online]. Available: <https://www.myptv.com/de/mobilitaetssoftware/ptv-vissim>. [Zugriff am 25 06 2022].
- [27] GitHub, Inc., „MATSim – Mobility as a Service“, 2022. [Online]. Available: <https://github.com/matsim-org/matsim-maas>. [Zugriff am 30 06 2022].
- [28] MATSim Community, „MATSim Community“, 2022. [Online]. Available: <https://matsim.org/about-us>. [Zugriff am 30 06 2022].
- [29] Regionalverband Großraum Braunschweig, „flexo Stops im Großraum Braunschweig“, o.J.. [Online]. Available: <https://webgis.regionalverband->

- braunschweig.de/portal/apps/webappviewer/index.html?id=967e1854a49947fbb0b8243d99cc278a&find=Salzgitter-Bad. [Zugriff am 30 06 2022].
- [30] B. Scheier, Interviewee, *Gespräch über das flexo-Angebot in Salzgitter-Bad*. [Interview]. 12 08 2022.
- [31] C. Nobis und T. Kuhnimhof, „Mobilität in Deutschland - MiD,“ 2017.
- [32] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, „Kurzdossiers - Modellprojekte zur Stärkung des ÖPNV,“ 03 29 2022. [Online]. Available: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/modellprojekte-nahverkehr.html>. [Zugriff am 15 06 2022].
- [33] T. Koska, „Chancen, Risiken und Effizienzpotenziale durch der Digitalisierung im Verkehr mit Schwerpunkt On-Demand-Angebote,“ 2021.
- [34] Projektteam Hub Chain, „Leitfaden für den Betrieb von On-Demand-Bussen im suburbanen und ländlichen Raum,“ Mai 2021.
- [35] Regionalverband Großraum Braunschweig, „flexo in Salzgitter-Bad,“ o.J.. [Online]. Available: <https://www.flexo-bus.de/salgitter-bad/>. [Zugriff am 27 06 2022].
- [36] Regionalverband Großraum Braunschweig, „flexo in Hoheneggelsen/Baddeckenstedt,“ o.J.. [Online]. Available: <https://www.flexo-bus.de/hoheneggelsen-baddeckenstedt/>. [Zugriff am 27 06 2022].
- [37] Europäisches Parlament, „Selbstfahrende Autos in der EU: Science Fiction wird Realität,“ 14 01 2019. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20190110STO23102/selbstfahrende-autos-in-der-eu-science-fiction-wird-realitat>. [Zugriff am 28 06 2022].

Anhang

An die Arbeit angehängt befinden sich folgende Dokumente, welche als Quelle benutzt wurden:

- Auswertung.xlsx
- 02-netzte-leistungsfähigkeit.pdf
- 2021_Ridepooling messbar machen_Liebchen.pdf
- DL_Boeler_ua.pdf
- hubchain-leitfaden.pdf
- MiD2017_Ergebnisbericht.pdf
- roadmap-2045-ag-verkehr-dritte-sitzung-impulsvortraege.pdf
- roadmap-2045-ag-verkehr-inputpapier-dritte-sitzung.pdf
- Scheier2021_Article_ChancenUndPotenzialeVonMobilit.pdf
- SV_ON-Demand_Verkehr.pdf
- Vortrag_Eckermann_MW-NI_2019-08-28_Bedarfs-on-demand-verkehre.pdf
- WissForumMobil-2020-FGSV-Preprint

- Ordner: Modellregion Hoheneggelsen_Baddeckenstedt
- Ordner: Modellregion Salzgitter-Bad

Auf dem Weg zum Hamburg-Takt (AWHT)
Hamburg

Mobilität und Fläche clever vernetzt im Wendland (CleverMoWe)
Niedersachsen

CuX und quer – Erfahrungen in Grün (CuX)
Niedersachsen

Digitale Mobilitätsinnovationen in Freyung – Grafenau (DiMoFRG)
Bayern

Lippe Intelligent Vernetzt (LIV)
Nordrhein-Westfalen

**Mehr klimafreundliche Mobilität zur Stärkung von Partizipation und Inklusion in der
Regiopolregion Rostock (MIRROR)**
Mecklenburg-Vorpommern

Modellregion Hannover: Wendepunkte im Verkehr (MoHaWiV)
Niedersachsen

Multimodale Mobilität in Leverkusen und im Rheinisch-Bergischen Kreis (MUMOLEVRBK)
Nordrhein-Westfalen

**Kreisübergreifende Angebotsoffensive zum Ausbau und zur Schaffung eines metropolitanen Stadt-
Land-Taktes (ÖVer.KAnT)**
Schleswig-Holstein

RMVall-in – die generelle Mobilitätsplattform (RMVall-in)
Hessen

STADTLand+ – Mitteldeutschland vernetzt (STADTLand+)
Sachsen-Anhalt

Neue öffentliche Mobilität durch Innovation, Nachhaltigkeit und Digitalisierung (VGI newMIND)
Bayern



Abbildung 44: Liste der Modellprojekte des BMDV [32]

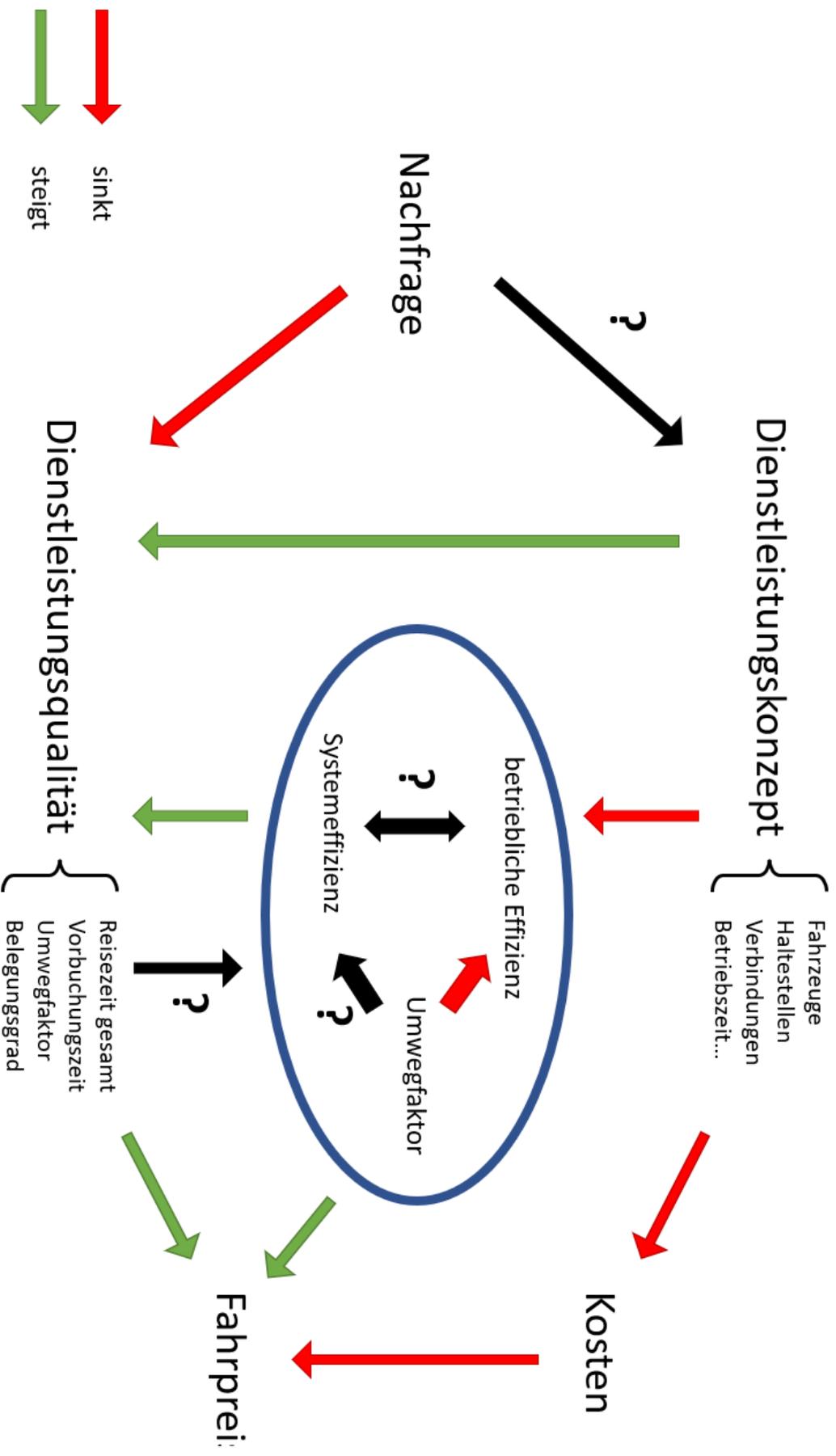


Abbildung 45: Schaubild Zielkonflikte und deren Zusammenhänge

	A	HT	HU	HV	HV	HK	HY	HZ	IA	IB	IC	ID
1												
2	Auswertungskriterium											
3	Simulations ID		SZ12.3		SZ13				SZ14			SZ15
4	Durchlauf	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	Durchgang 1	Durchgang 2	0-14400	0-14400
5	Simulationszeitraum Auswertung	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
6	df1	Fehlauk/3600	Fehlauk/3600	Fehlauk/3600	Fehlauk/3600	Fehlauk/3600	Fehlauk/3600	Fehlauk/3600	default	default	Fehlauk/3600	Fehlauk/3600
7	df1 min/max	default	default	default	default	default	default	default	default	default	default	default
8	simstep	10	15	25	15	25	15	29	15	15	25	15
9	Anzahl Fahrzeuge	300	300	300	330	330	360	360	360	360	360	390
10	n_personinfo_low	21	18	0	21	0	15	0	15	11	0	36
11	n_filtered	0,07	0,053333	0	0,063636	0	0,041667	0	0,04166667	0,03055556	0	0,032308
12	rate_filtered	9	8	7	8	9	9	9	8	8	8	10
13	n_waiting_only	270	278	293	301	323	338	351	337	341	352	344
14	n_rides	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
15	n_trips	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
16	requests_per_trip	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
17	n_trips_pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
18	n_persons_pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
19	rate_pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
20	waiting_time_mean	14,3921	13,53231	3,183447	14,365399	3,648702	11,85714	2,348291	13,0403661	12,7107527	4,6445502	15,22912
21	waiting_time_std	9,784691	8,804239	2,308854	9,722324	2,765758	8,653296	2,434572	8,90242006	7,80939365	3,287709	9,716756
22	distance_ride	2363,025	2373,181	1319,535	2913,441	1614,228	3109,518	1737,029	3119,43367	3322,69237	1757,831	3185,051
23	distance_ride_mean	8,751944	8,599482	4,503534	9,679208	5,009749	9,254517	4,346801	9,256417973	9,74396589	4,598939	9,258869
24	duration_ride_mean	13,50019	13,36624	5,434369	14,24208	5,302011	13,26811	5,646344	13,8633783	14,5756538	5,866005	13,26265
25	duration_trip_mean	16,72139	16,528	8,576313	17,48807	9,093937	17,24082	9,555501	17,1724925	17,7091913	9,042304	16,49099
26	timeless_rel_mean	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
27	timeless_rel_max	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
28	n_walks	533	540	576	598	636	661	698	656	673	692	682
29	distance_walk_mean	0,094802	0,094332	0,032867	0,095095	0,095806	0,120368	0,121897	0,09742425	0,09378499	0,095652	0,094242
30	duration_walk_mean	1,6106	1,579817	1,540972	1,622993	1,595493	1,986359	1,954578	1,64425813	1,56676573	1,588126	1,614174
31	n_vehicles	10	15	25	15	25	15	29	15	15	25	15
32	distance_vehicle	963,7159	1028,083	1859,729	1152,43	2343,242	1207,631	2397,345	1232,4916	1229,62887	2806,459	1334,28
33	distance_vehicle_mean	96,37159	68,53887	74,39317	76,82889	93,17267	80,50974	82,66705	82,1661067	81,975258	112,2585	88,35064
34	distance_vehicle_occupied	9012,635	904,4492	1919,535	1025,376	1614,228	706,296	1737,029	1112,52798	1127,69778	7157,831	1205,545
35	distance_vehicle_occupied_mean	90,12635	60,29661	52,7814	68,35897	64,58192	73,75304	59,8754	74,168532	75,179882	80,3897	60,3897
36	duration_vehicle_diving	1349,617	1431,067	2388,817	1555,787	2887,833	1533,3	2828,067	1688,28333	1683,13333	3440,55	1796,067
37	duration_vehicle_occupied	1270,367	1259,85	1619,617	1385,8	1905,567	1409,933	1993,567	1516,21687	1552,06687	2076,583	1624,617
38	duration_vehicle_occupied_mean	62,45242	123,6338	540,1942	127,0548	723,0136	101,3955	860,3158	119,96362	101,93109	1048,628	128,7142
39	distance_vehicle_empty	104,38	144,4122	143,76	138,0989	123,7393	137,5967	141,6517	128,597778	127,801778	101,634	120,0789
40	duration_vehicle_stop_mean	2,86929	2,928193	0,993937	3,093424	0,994385	3,161911	0,994131	3,08690461	3,20237533	0,99435	2,808262
41	passengers_per_time_occupied	2,700804	2,577856	0,673911	2,755469	0,656165	2,907509	0,700795	2,80461952	2,96300432	0,600151	2,54019
42	passengers_per_time_diving	2,451893	2,308355	0,709531	2,528085		2,57489		2,53059792	2,70279125		
43	betriebsliche_effizienz(strecke)	1,3693216	1,283491		1,4004717		1,438377		1,42624174	1,42356221		
44	systemeffizienz(strecke)	1,790801	1,798497		1,804851		1,790136		1,77459252	1,89022292		
45	Umwegfaktor(durchschnitt(strecke))	1,9282	1,12493		1,217963		1,23255		1,23770942	1,22678932		
46	systemeffizienz(zeit)	6,480376	12,02586		11,02494		8,391261		9,73942293	8,23958172		
47	Leertilometer Anteil an Gesamtkilo				2,262958							
48	Umwegfaktor(zeit)											

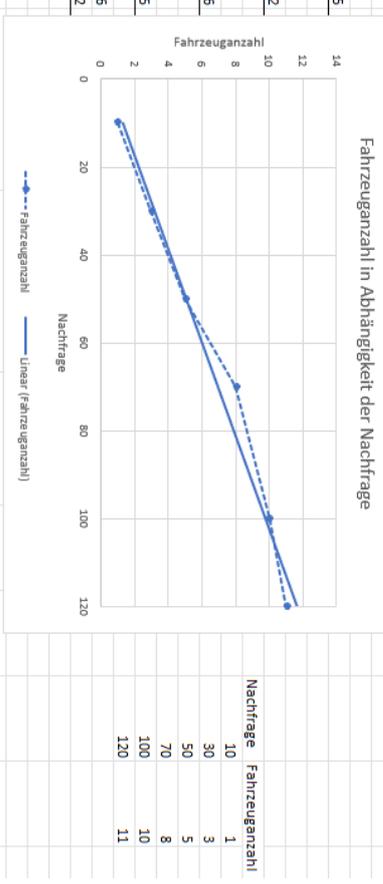
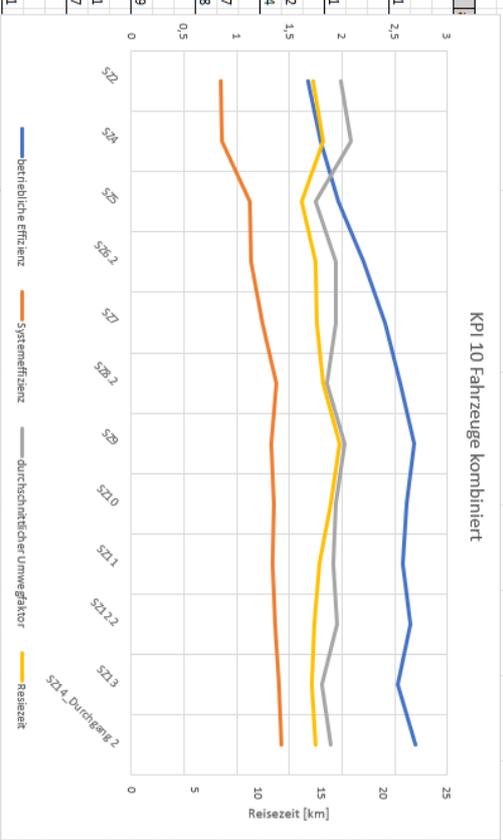
Abbildung 48: Auswertungstabelle der verschiedenen Szenarien Salzgitter-Bad (3)

	A	F	H	I	U	K	L	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	JA	JC	JD
1																						
2																						
3																						
4	Auswertungskriterium	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400
5	Durchlauf	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
6	Simulationszeitraum Auswertung	default/3600																				
7	dr/min/max	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8	simstep	default																				
9	Anzahl Fahrtenzeuge	5	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
10	n_personenn_max	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	
11	n_fliedert	38	12	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
12	rate_fliedert	0,1857142858	0,0571428571	0,0285714286	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	0,0428571429	
13	n_walking_only	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
14	n_rides	169	196	201	206	206	206	206	194	202	202	197	197	201	169	176	194	194	194	197	204	
15	n_rumps	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
16	n_requests_per_rump	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
17	n_rumps_pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
18	n_persons_pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
19	rate_pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
20	waiting_ride_mean	16,34439112	16,45204082	14,19875622	13,66725	13,52312	14,01227122	15,3901075	13,89328	14,3757	14,21566	16,38722	14,06875258	7,04247318	14,0183908	13,30736041	7,336833333	13,5707483	7,324833333	7,196160131	2,927324	
21	waiting_ride_std	11,01297172	12,05757521	9,504820529	10,58198	9,769665	9,77673056	10,1309799	9,170965	9,44459	11,35897	9,16339839	3,26661479	9,850306325	9,49561945	3,044468002	8,586232544	3,200739494	3,097036601	2,22204	2,22204	
22	distance_ride	1483,13334	1943,10901	1974,89566	2725,03	2097,906	2198,35491	1812,66524	1772,465	1962,942	1408,188	1531,337	2043,39242	1046,63259	1675,98712	1903,97878	1077,55417	1479,30359	1082,48211	1077,21966	1057,424	
23	distance_ride_mean	8,775972426	9,91382448	9,820555257	10,31668	10,81935	10,5859154	9,2013364	8,50666	9,785883	7,66606	8,700777	10,53295062	5,632182204	9,632108865	9,664886694	5,38977065	7,547467296	5,41241055	5,430919706	5,083766	
24	duration_ride_mean	12,78577909	13,7872449	14,99308789	15,62238	16,19485	16,62912541	13,8596447	13,38106	14,64701	10,8051	12,78739	15,88590516	7,306422939	14,55949398	14,7550764	6,172725	10,96471088	6,988975	6,918283797	6,5334394	
25	duration_ride_std	15,7704152	16,88232711	18,0721587	13,02855	13,40847	13,80250912	17,1001623	16,49322	17,80524	14,19322	16,07926	16,31744931	10,43219462	17,75094539	17,23249035	9,711215059	14,057932237	9,31671132	9,316931908	3,071727	
26	timeloss_ride_mean	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
27	timeloss_ride_std	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
28	n_walls	331	386	396	407	384	397	384	388	391	359	341	382	368	388	386	397	397	383	394	402	
29	distance_walk_mean	0,090021571	0,091844322	0,09461536	0,092384	0,092328	0,093823674	0,094454638	0,092515	0,095917	0,0939484	0,092738	0,091964241	0,092418693	0,093363196	0,092574326	0,090876977	0,092743029	0,090612589	0,089359577	0,092462	
30	duration_walk_mean	1,502316213	1,547841105	1,598631987	1,602785	1,606814	1,59861856	1,6202691	1,591082	1,579113	1,634058	1,630938	1,589172077	1,598685942	1,596449704	1,538687332	1,491981528	1,546605744	1,55571066	1,538882255	1,582714	
31	n_vehicles	5	7	8	9	9	10	11	11	12	12	12	14	15	15	15	16	17	17	17	20	
32	distance_vehicle	633,47305	811,17039	746,46791	809,1	753,7517	794,56732	798,94448	803,7477	761,2932	930,3739	807,3841	771,69337	1209,24378	723,47241	839,31405	1323,35587	923,75659	1320,12609	1300,89284	1389,546	
33	distance_vehicle_mean	126,61961	151,8914843	93,30723875	89,9	83,79019	79,456732	72,631954	73,06797	63,4411	77,5316	67,28201	55,186124	80,616252	48,23194	55,95427	82,7097238	54,3366467	77,6547658	65,104632	55,58184	
34	distance_vehicle_std	575,28564	759,80338	701,98318	744,8095	679,0314	728,5539	700,21029	715,8559	698,0282	708,4643	603,0196	688,4407	821,48526	657,68351	730,2436	922,7442	733,9282	877,60603	914,2817	1057,424	
35	duration_vehicle_occupied	115,157128	108,5004823	87,7434175	82,73428	75,44793	72,885539	63,660327	65,0779	58,16902	59,03689	58,58497	48,8864787	54,76584	43,8456733	48,6230687	57,6715735	43,1723056	51,6238812	45,173095	42,29594	
36	duration_vehicle_occupied_mean	787,9166667	1003,866667	951,0833333	1003,015	1023,317	1072,583333	1095,86667	1114,817	1046,017	1232,717	1074,35	926,4666667	1035,433333	1002,216667	1190,333333	1632,566667	1250,633333	1675,466667	1738,333	1738,333	
37	duration_vehicle_occupied_std	781,9166667	1003,866667	951,0833333	1003,015	1023,317	1072,583333	1095,86667	1114,817	1046,017	1232,717	1074,35	926,4666667	1035,433333	1002,216667	1190,333333	1632,566667	1250,633333	1675,466667	1738,333	1738,333	
38	duration_vehicle_occupied_mean	156,3833333	143,4056238	178,9854187	175,0241	102,3296	98,94166667	87,9933934	88,68182	79,84444	78,80956	78,45193	66,17919048	67,63222222	60,54222222	65,43444444	109,07045	109,07045	442,52006	388,63094	332,1224	
39	duration_vehicle_occupied_std	57,688741	57,688741	44,48473	64,49144	74,7203	68,600793	98,67388	87,89077	63,28448	221,9396	104,3644	87,22467	387,75652	65,7899	409,07045	400,61747	893,82779	442,52006	388,63094	332,1224	
40	duration_vehicle_stop_mean	70,52866667	86,58995238	118,7354187	115,4889	126,0426	132,6833333	140,232424	138,5697	152,7238	137,1653	187,1653	180,3125	186,3416667	137,4544444	173,0022222	164,461111	134,0041667	166,1818725	155,4166667	169,7553	
41	passengers_per_line_mean	2,759138668	2,681891353	3,14609335	3,149848	3,39153	3,35418157	2,820380777	2,725628	3,072893	2,090941	2,286023	3,325966634	1,33877892	2,789348113	2,841062302	1,19537152	2,16761454	1,26710381	1,248808206	0,934414	
42	passengers_per_line_std	2,54502379	2,516930876	2,964918228	2,90918	3,064224	3,094193022	2,491949386	2,205011	2,514525	1,8104045	2,0887748	2,294557823	0,885530366	2,527497381	2,46701563	0,79436399	1,78121252	0,819982079	0,859838377	0,7091726	
43	benutzbar_effizienz_strecke	2,341282459	2,356438781	2,664689507	2,625412	2,783285	2,691219304	2,26882253	2,205251	2,576432	1,8104045	2,0887748	2,294557823	0,885530366	2,527497381	2,46701563	0,79436399	1,78121252	0,819982079	0,859838377	0,7091726	
44	systemeffizienz_strecke	1,689346313	1,306579333	1,416588673	1,306914	1,402881	1,33881755	1,323282694	1,386984	1,386984	1,386984	1,386984	1,386984	1,386984	1,386984	1,386984	1,386984	1,386984	1,386984	1,386984	1,386984	
45	Umweltgrad durchschnitl(strecke)	1,48539687	1,837587704	1,867646357	2,009523	1,839378	1,75064748	1,72620058	1,714820146	1,707058	1,739673	1,700716	1,448177	1,382425184	0,830330461	1,234436381	1,080582457	1,079415441	1,386984	1,041753833	0,7091726	
46	systemeffizienz(zeit)	1,48539687	1,837587704	1,867646357	2,009523	1,839378	1,75064748	1,72620058	1,714820146	1,707058	1,739673	1,700716	1,448177	1,382425184	0,830330461	1,234436381	1,080582457	1,079415441	1,386984	1,041753833	0,7091726	
47	Lebensdauer Anteil an Gesamtlo	9,106529473	6,369439841	5,956763188	7,370763	9,31879	8,307405595	12,3505315	10,93512	8,310199	23,85166	12,92624	11,3038741	32,06619528	9,039491209	12,39518335	30,217239608	20,54953176	33,52104495	33,52104495	23,9015	
48	Umweltgrad(zeit)																					

Abbildung 49: Auswertungstabelle der verschiedenen Szenarien Salzgitter-Bad (4)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
44														
45														
46														
47	Scenario	Nachfrage	Fahrzeuganzahl	betriebliche Effizienz	Systemeffizienz	durchschn. Umwegfaktor	duration_ride_mean							
48		10	2	1,8835	0,8467	1,9872	14,38525641							
49	SZ2	10	5											
50		10	10	1,8835	0,8467	1,9872	14,38525641							
51		20	2											
52		2	5											
53	SZ4	10	10	1,7953	0,861	2,0852	15,14137931							
54		3	3											
55	SZ5.2	30	10	2,3243	1,0815	2,149	15,87022472							
56	SZ5	10	10	1,9631	1,1254	1,74422	13,4373494							
57		40	10	2,20722	1,139	1,9378	14,61969697							
58	SZ6.2	40	10	2,2697	1,137	1,9846	15,31032448							
59	SZ6	50	5											
60		50	10	2,4076	1,23999	1,9416	14,66598639							
61	SZ7	10	10											
62		60	10	2,5593	1,3779	1,8574	15,20828221							
63	SZ8.2	60	10	2,3919	1,30144	1,8379	13,92109827							
64	SZ8	70	8	2,6456	1,4165	1,8676	16,42912541							
65		70	10	2,6912	1,3308	2,0223								
66	SZ9	80	10	2,5138	1,3241	1,8985	15,80165165							
67		80	10	2,5184	1,35122	1,9378								
68	SZ10.2	90	10	2,5738	1,3393	1,9216	14,84794872							
69	SZ10	100	quasi 10	2,6534	1,3613	1,9492	14,49742206							
70		110	15	2,528	1,4007	1,8048	14,24208195							
71	SZ11	15	15	2,53099	1,4262	1,7746	13,88397626							
72		120	15	2,70219	1,4296	1,890222	14,57565982							
73	SZ12.2													
74														
75														
76														
77														
78														
79														
80														
81														
82														
83	SZ13													
84														
85	SZ14_Durchgang 1													
86	SZ14_Durchgang 2													
87														
88														
89														

Abbildung 50: Übersicht konstante Fahrzeuganzahl Salzgitter-Bad



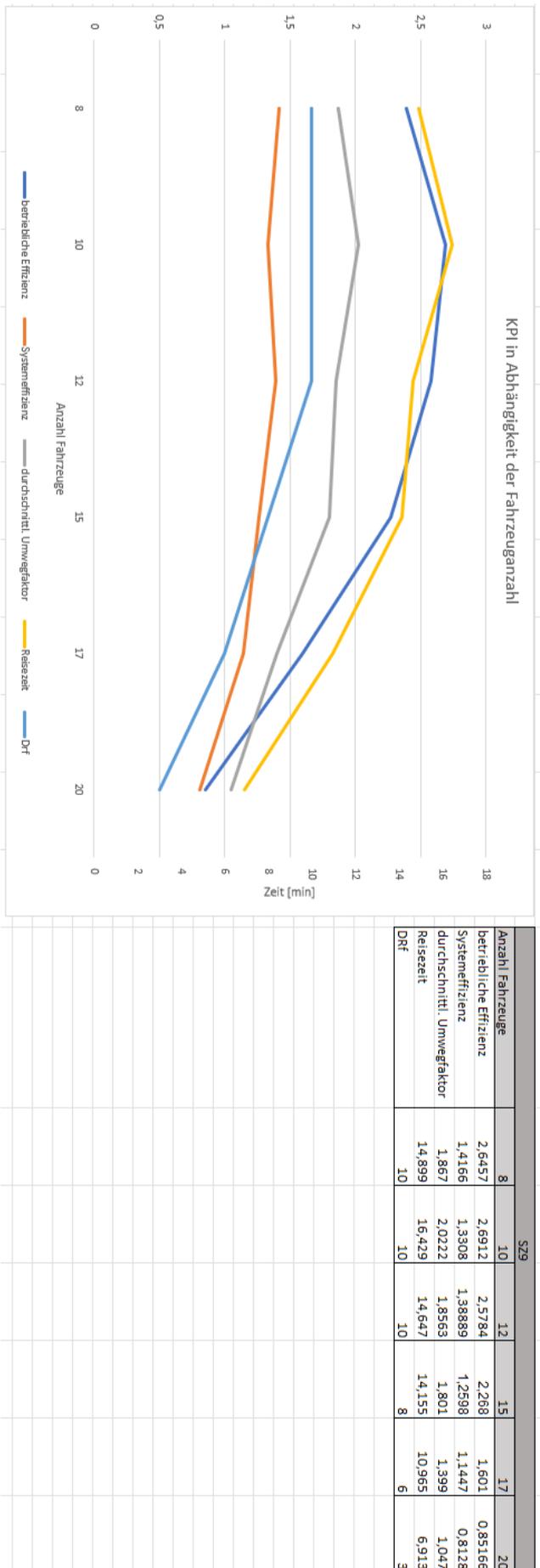


Abbildung 51: Übersicht KPI in einem Szenario Salzgitter-Bad

A		BR	BS	CB	CC	CK	CL	CM	CN	CU	CV	CX
1	Auswertungsstadium											
2	Simulation ID	HB9	HB10	HB11	HB11.1	HB11.2	HB12	HB12.1	HB12.2	HB13		
3	Durchlauf	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400
4	Simulationzeitraum-Auswertung	Greedy										
5	df	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
6	df min/max	default/3600										
7	df min/max	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
8	smstep	31	31	47	47	47	47	47	47	47	47	47
9	Anzahl Fahrzeuge	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
10	r. person/floor_low	210	210	240	240	270	270	270	270	300	300	330
11	r. filtered	0	4	4	4	0	0	0	0	23	4	0
12	r. rate, filtered	0	0,00666667	0	0,0037037	0	0	0	0,01333333	0	0,069697	0
13	r. walking, only	16	15	20	20	24	25	25	26	24	24	24
14	r. rides	194	195	216	245	245	247	245	270	275	283	306
15	r. trips	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
16	requests_per_trip	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
17	r. trips, pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
18	r. person, pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
19	rate, pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
20	walking, ride, mean	13,6567869	2,23623332	15,7392747	2,8688339	14,140763	2,4536735	13,8226046	14,4271605	2,852303	20,620259	2,4683978
21	walking, ride, std	10,6310416	2,53420846	12,1738974	2,529816	10,95798	2,6610745	10,6272711	11,1430228	2,8661286	13,030295	2,5166787
22	distance, ride	3233,36403	2005,74807	3587,95743	2203,685	3764,89673	2491,7746	4203,54438	4450,38633	2397,003	4180,9547	3233,36226
23	duration, ride, mean	16,3767033	10,2656872	16,670314	10,076656	15,3663254	10,170508	17,0784007	10,170508	16,4623197	10,68007	14,773682
24	duration, ride, mean	16,845789	8,9759042	16,7446759	6,643636	17,1796559	6,6097959	19,0467181	6,6097959	18,5675309	9,07697	5,522782
25	duration, trip, mean	22,8757672	12,9142326	22,8423328	12,75363	21,3376599	12,686755	23,1861299	22,581447	12,355036	19,387037	12,889325
26	timeloss, vel, mean	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
27	timeloss, vel, max	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
28	r. walls	332	389	441	447	500	502	498	545	551	570	676
29	distance, walk, mean	0,1246598	0,12403995	0,12872308	0,126822	0,1378226	0,1303577	0,12967297	0,1282247	0,1232284	0,1208978	0,1198709
30	duration, walk, mean	1,98528912	1,97039417	2,04882842	2,0544936	2,106	2,0384794	2,0689759	2,0069419	1,9378697	1,9291228	1,8976667
31	r. vehicles	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
32	distance, vehicle	125,54882	2456,00606	126,13165	2724,154	143,757047	2246,6603	143,326322	2244,6603	143,767472	2556,422	152,97583
33	duration, vehicle, mean	125,54882	79,2277697	126,13165	59,1745	143,757047	62,717239	143,326322	62,717239	143,767472	75,66655	152,97583
34	distance, vehicle, occupied	102,344287	2005,74784	115,259775	2203,685	129,62376	2491,7742	128,417979	2491,7742	141,234212	2297,0026	3233,36223
35	duration, vehicle, occupied, mean	103,0667	64,7015432	102,78657	48,88843	143,026783	53,06473	128,417979	53,06473	141,234212	62,489418	88,80857
36	duration, vehicle, dining	103,82	1756,33333	102,78657	2457,1	143,026783	2875,75	143,026783	2875,75	151,96667	3763,35	3442,05
37	duration, vehicle, occupied	103,82	56,659314	102,78657	1500,533	1370,53333	2117,5867	1303,18667	2117,5867	144,127667	2503,8833	2796,6333
38	duration, vehicle, occupied, mean	102,78657	450,31302	108,7189	401,6756	141,38884	456,87803	130,318667	45,05461	144,127667	177,045	59,502837
39	duration, vehicle, empty	125,635	167,537634	126,13165	530,5255	141,38884	456,87803	149,14343	456,87803	85,33226	619,47947	138,0382
40	duration, vehicle, stop, mean	125,635	167,537634	126,13165	530,5255	141,38884	456,87803	149,14343	456,87803	85,33226	619,47947	138,0382
41	passenger_per_time, dining	3,52744738	0,35623911	3,42537471	0,396158	3,21768227	0,3891428	3,61035938	0,3918434	3,47947305	0,3956333	2,4672818
42	passenger_per_time, dining	3,22681271	0,18842208	3,18452403	0,17732	2,91860746	0,3984228	3,28303938	0,8084228	3,229398003	0,7886318	3,3095931
43	benetliche Effizienz (Strecke)	2,32680727	0,8786524	2,38452403	0,801585	2,21683021	0,845058	2,33284926	0,845058	2,2978198	0,8258306	2,3095931
44	systemeffizienz (Strecke)	1,76201778	0,8786524	1,74717282	0,801585	1,73353842	0,845058	1,73863242	0,845058	1,73616341	0,8258306	1,7328142
45	Umwagfaktor (Strecke)	1,84196301	4,65935782	1,7281778	1,51032391	1,93536203	1,4879181	1,88363641	1,51528221	1,5018495	1,2328142	1,4879181
46	Umwagfaktor (Zeit)	2,08932279	154433396	1,7281778	1,4879181	1,93536203	1,4879181	1,88363641	1,51528221	1,5018495	1,2328142	1,4879181
47	Systemeffizienz (Zeit)	1,54733336	4,65935782	1,4879181	1,4879181	1,93536203	1,4879181	1,88363641	1,51528221	1,5018495	1,2328142	1,4879181
48	Leerkilometer Anteil an Gesamtkilometer	3,07185933		6,61918187		9,03377515		10,4058646		5,59787246		7,14530366

Abbildung 53: Auswertungstabelle der verschiedenen Szenarien Hohenegele-
sen/Baddeckenstedt (2)

	A	C2	DA	DB	DC	DD	DE	DF	DG	DH	DI	DJ	DK	DL	DM
Auswertungskriterium															
1															
2															
3															
4	Durchlauf														
5	Simulationzeitraum Auswertung	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400
6	drf	default/3600													
7	drf min:max	default													
8	sfnstep	6	7	7	6	3	3	6	10	11	12	12	13	14	15
9	Anzahl Fahrzeuge														
10	n_personinfo_raw	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210
11	n_filtered	11	43	1	6	6	32	8	0	2	7	1	0	7	0
12	rate_filtered	0,05238095	0,2047619	0,0047619	0,02857143	0,02857143	0,15238095	0,03809524	0,00952381	0,03333333	0,00476191	0	0,03333333	0	0
13	n_waiting_only	17	16	17	16	15	15	17	16	17	16	17	16	15	16
14	n_rides	182	182	192	188	189	189	185	194	191	187	192	194	188	194
15	n_trips	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
16	requests_per_trip	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
17	n_trips_pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
18	n_persons_pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
19	rate_pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
20	waiting_ride_mean	21,0611722	10,41615	16,267369	15,4806738	15,6123457	10,0141104	13,0791892	13,8667869	16,0899529	8,86889493	15,1753472	16,787543	13,8634752	14,8387457
21	waiting_ride_std	13,5030669	5,8600396	11,7705492	11,7705492	11,7705492	6,09418174	9,47122088	10,6310416	12,331063	5,6147469	10,4365199	11,719397	10,283916	10,3706691
22	distance_ride	3199,44155	2104,16588	3529,0273	3136,89118	2950,14549	2132,99541	3157,36618	3293,36403	3336,9197	2246,82217	3319,81349	3388,7708	3506,6522	3012,06402
23	duration_ride_mean	17,5793492	13,934826	18,38035	16,6855914	15,6023254	11,0859514	17,0766442	16,9761033	17,4695915	12,0190918	17,2906953	17,467891	18,6524053	15,5261032
24	duration_ride_std	18,5979854	13,650993	19,818924	17,942624	17,2375661	13,0599978	18,4702709	18,845189	19,11082	12,1860784	18,8864931	18,67878	20,0595706	17,2698454
25	duration_trip_mean	22,8532721	17,89713	23,715917	22,0235256	21,3419101	17,2664634	22,5040504	22,8761672	23,1609528	16,3218969	22,8893059	22,873639	24,038493	21,253944
26	inloss_rel_mean	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
27	inloss_rel_max	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
28	n_walks	372	302	388	380	376	330	373	392	387	377	389	389	378	392
29	distance_walk_mean	0,12494763	0,13005941	0,1264528	0,12586505	0,12686729	0,12480249	0,1270715	0,1246598	0,12698662	0,12825154	0,12583784	0,1259389	0,12554773	0,1237587
30	duration_walk_mean	2,02764337	2,1230684	2,0484966	2,0401358	2,05217199	2,093328283	2,01689008	1,98528912	2,02493954	2,062300893	2,01328192	1,9974293	1,98999118	1,992049332
31	n_vehicles	6	6	7	7	9	9	9	10	11	12	12	13	14	15
32	distance_vehicle	1179,97367	1251,4471	1272,8149	1251,74205	1145,30655	1411,59109	1255,98877	1125,54882	1214,1848	1170,56403	1182,77243	1302,9745	1210,76681	1206,95997
33	distance_vehicle_mean	195,662278	178,77876	181,80123	156,467756	127,256283	169,77449	139,665197	112,554882	110,374228	117,579510	99,3977025	100,22881	86,4683436	80,4639313
34	distance_vehicle_occupied	1100,65201	1018,8538	1186,339	1121,31047	1060,5743	1108,16487	1054,14696	1023,44287	1137,50712	1298,28241	1101,86627	1208,3396	1061,018	1088,09821
35	duration_vehicle_occupied_mean	183,436668	145,55054	169,417	140,163909	117,84189	123,12943	117,127862	102,344287	103,409738	108,190201	97,8221892	92,9449	75,7888571	72,5338807
36	duration_vehicle_occupied_std	1149,96867	1170	1226,45	1221,16867	1138,8	1414,85	1236,75	1133,06667	1188,55	1678,28333	1176,96667	1264,1833	1189,3	1205,28667
37	duration_vehicle_occupied_max	1082,93333	954,78333	1151,1667	1103,53333	1064,66667	1056,3	1050,31667	1038,2	1121,2	1229,66667	1093,01667	1177,1	1052,3	1092,28333
38	duration_vehicle_occupied_mean	180,488889	136,39762	164,45238	137,941667	118,296296	117,366667	116,701852	103,82	101,927273	102,472222	91,0847222	90,546154	75,1642857	72,8188889
39	duration_vehicle_occupied_std	73,365366	232,58338	86,27594	130,43158	84,73225	98,378621	202,83781	102,10595	78,60936	472,67162	90,90616	94,63489	149,75081	118,86076
40	duration_vehicle_stop_mean	48,5472222	72,87381	64,809524	87,3468333	113,433333	82,7611111	102,55	126,635	131,868667	100,034722	141,81111	142,62179	154,963095	159,465556
41	passengers_per_time_occupied	3,12561651	2,1691919	3,2721876	3,0568477	3,06001879	2,03690555	3,25330456	3,52144738	3,25563385	1,85470917	3,31470012	3,0784838	3,58357883	3,08729023
42	passengers_per_time_during	2,94598045	1,7617949	3,0713305	2,7623857	2,8601841	1,5207148	2,7628866	3,2266124	3,0715112	1,9582827	3,0777199	2,8664223	3,17344105	2,77975828
43	benutzliche Effizienz (Strecke)	2,728530946	1,6819805	2,7730519	2,50602045	2,57585665	1,42365888	2,51855315	2,92600727	2,748247	1,26870722	2,78327484	2,6007959	2,89622425	2,49558112
44	systemeffizienz (Strecke)	1,70851192	1,60271429	1,576084	1,60238529	1,71572162	1,34641302	1,53957949	1,78201778	1,65202272	1,10298051	1,68185482	1,5339609	1,65659316	1,66181955
45	Umwegfaktor durchschritt (Strecke)	1,55513835	1,0490644	1,7594569	1,56395079	1,47084553	1,06344137	1,57415935	1,64186301	1,66856489	1,12019165	1,85514384	1,68895237	1,74830147	1,50177607
46	Umwegfaktor (Zeit)	1,9343747	1,1779979	2,1528812	1,92780285	1,86183446	1,22999329	1,95275741	2,08803678	2,08803678	1,30038622	2,07012096	2,0708734	2,15506239	1,91486806
47	Leertakte (Zeit)	1,522286266	1,4958584	1,4267466	1,43291934	1,53955595	1,28676244	1,41486423	1,54943396	1,474224209	1,04263265	1,48673143	1,3841611	1,47255182	1,45182256
48	Streckennetzanteil Gesamtkilometer	6,24832242	16,585953	6,7794222	10,4200047	7,39621579	25,7242776	16,0362933	9,07165993	6,30969952	26,6302253	7,62141694	7,2629887	12,5662619	9,84795365

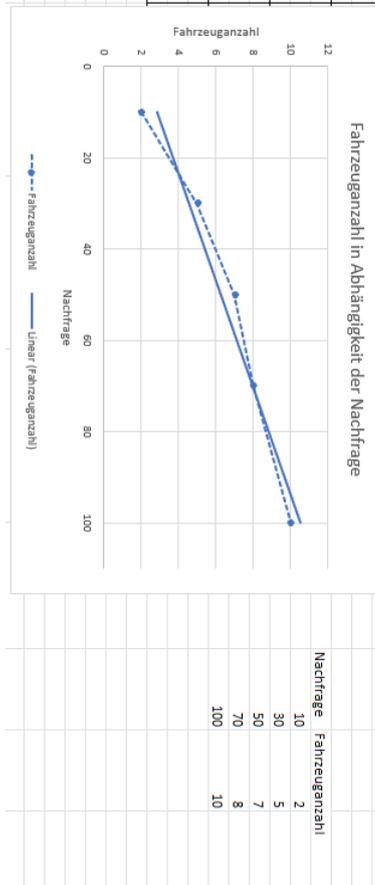
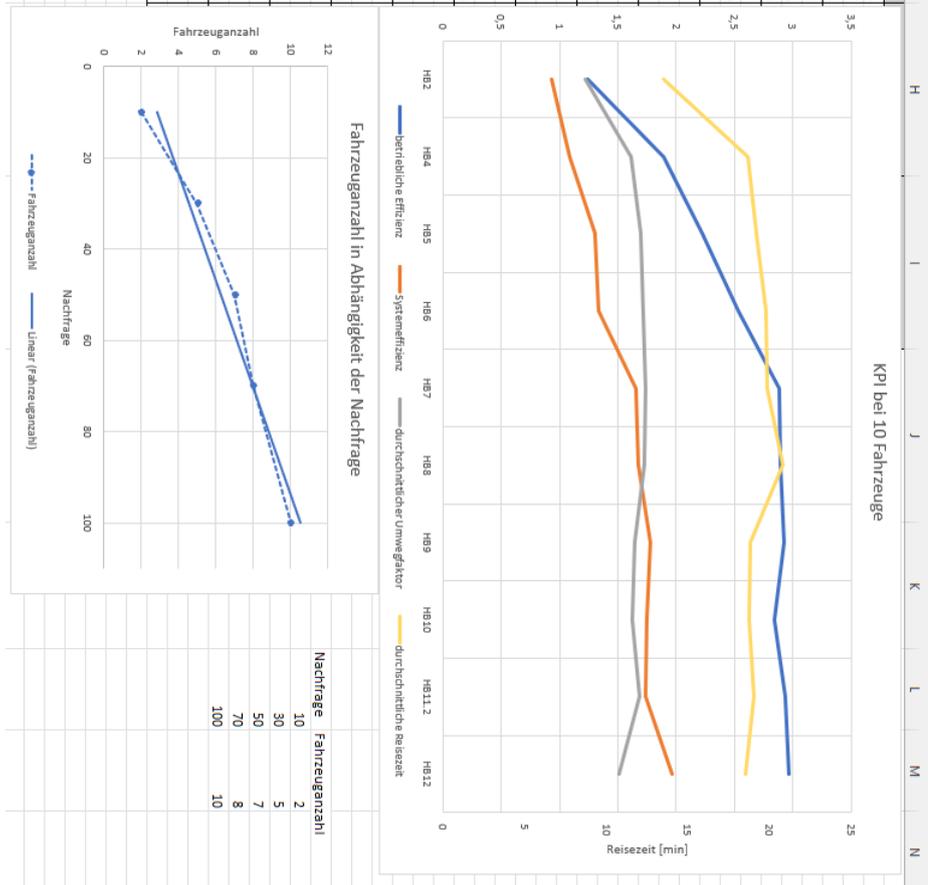
Abbildung 54: Auswertungstabelle der verschiedenen Szenarien Hohengelsen/Baddeckenstedt (3)

	A	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB	EC
1																		
2	Auswertungskriterium																	
3	Simulations ID																	
4	Durchlauf	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400
5	Simulationszeitraum Auswertung	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400	0-14400
6	df	10	8	7	7	6	4	3.5	3	10	10	10	10	10	10	10	10	10
7	df min/max	default/3600																
8	simstep	default																
9	Anzahl Fahrzeuge	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
10	n_personinfo_raw	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210
11	n_filtered	0	3	5	0	6	12	12	8	7	5	6	6	6	6	6	6	6
12	rate_filtered	0	0,01423	0,02381	0	0,02857	0,05714	0,05714	0,0381	0,03333	0,02381	0,02857	0,00476	0,02857	0,00476	0,00476	0,00476	0
13	n_walking_only	16	17	16	17	17	16	16	18	16	16	15	15	15	15	15	15	15
14	n_rides	194	190	189	193	187	182	182	184	187	188	189	191	189	189	193	193	195
15	n_tips	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
16	requests_per_tip	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
17	n_tips_pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
18	n_persons_pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
19	rate_pooling	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
20	walking_ride_mean	14,8367457	14,8144	16,1526	14,2408	13,0669	16,3067	10,6188	10,2217	8,96693	15,5084	15,7822	15,5704	9,29462	14,9855	9,00915	2,8362393	
21	walking_ride_std	10,3706691	10,3974	12,0262	11,4571	12,0978	7,65254	7,56661	5,73338	11,7066	11,8759	11,0645	5,20722	10,6719	5,43497	2,6342085	2,6342085	2,6342085
22	distance_ride	3012,06402	3034,34	2927,85	3121,77	3088,53	3102,56	2556,98	2470,04	2162,44	3160,1	2905,74	3380,99	2265,05	3479,03	2262,38	2005,748	2005,748
23	distance_ride_mean	15,53032	15,3702	15,4913	16,1175	16,5162	17,0476	14,0494	13,4241	11,5638	16,8031	15,3743	17,7015	11,9844	18,026	11,7222	10,265867	10,265867
24	duration_ride_mean	17,2636454	17,2891	16,8585	17,202	18,1126	17,471	14,6432	13,8793	11,2079	16,0037	16,3956	19,3608	11,7817	19,4065	11,4939	8,9735043	8,9735043
25	duration_trip_mean	21,253944	21,4582	20,8378	21,1465	22,2158	21,4715	18,6714	18,0485	15,3273	22,0384	21,048	23,4831	15,8254	23,4567	15,4787	12,914293	12,914293
26	timeloss_rel_mean	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
27	timeloss_rel_max	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
28	n_walks	392	381	383	391	379	369	365	377	377	386	380	387	379	379	386	390	389
29	distance_walk_mean	0,1237587	0,12767	0,12295	0,12438	0,12844	0,12658	0,12657	0,12349	0,12734	0,12464	0,12354	0,12369	0,12547	0,12842	0,12397	0,1240399	0,1240399
30	duration_walk_mean	1,99204932	2,08451	1,98969	1,97225	2,05163	2,00027	2,0441	2,08457	2,05968	2,0736	2,0261	2,0615	2,02786	2,02513	1,9894	1,9703942	1,9703942
31	n_vehicles	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
32	distance_vehicle	1206,95897	1234,49	1183,74	1267,8	1177,86	1451,24	1308,2	1477,71	1634,44	1296,76	1185,08	1225,27	1953,43	1216,93	2003,94	2456,063	2456,063
33	distance_vehicle_mean	80,4533313	82,2932	77,5828	84,5198	78,5242	96,7491	87,2134	98,5138	126,236	81,0475	69,7103	68,0704	108,524	64,049	100,197	79,22777	79,22777
34	distance_vehicle_occupied	1088,09821	1103,41	1078,24	1087,17	1050,85	1192,88	1066,58	1173,69	1424,7	1171,73	1063,55	1091,22	1452,51	1132,33	1447,36	2005,7478	2005,7478
35	distance_vehicle_occupied_mean	72,5398807	73,5607	71,8826	72,478	70,0565	73,5256	71,1053	78,246	94,9797	73,2332	62,562	60,6235	80,6852	59,5365	72,3682	64,701543	64,701543
36	duration_vehicle_driving	1205,28667	1214,07	1146,43	1213,45	1157,63	1316,35	1260,13	1405,83	1765,02	1268,98	1161,32	1209,4	1831,42	1108,12	1872,68	2219,4167	2219,4167
37	duration_vehicle_occupied	1092,28333	1088,7	1070,82	1048,4	1036,62	1138,33	1032,62	1121,75	1318,47	1153,45	1068,48	1084,17	1354,62	1108,88	1351,68	1756,3333	1756,3333
38	duration_vehicle_occupied_mean	72,58	71,3878	69,8933	69,1078	75,8889	68,8441	74,7833	87,8978	72,0906	62,852	60,2315	75,2565	58,3623	67,5925	56,655914	56,655914	56,655914
39	distance_vehicle_empty	118,888076	131,078	85,5023	180,827	127,016	258,382	241,822	304,018	463,744	125,023	121,53	134,043	500,918	84,5384	556,581	450,31802	450,31802
40	duration_vehicle_stop_mean	159,465556	159,179	163,388	158,32	162,881	148,06	155,808	146,034	122,149	160,48	170,277	172,553	137,396	177,184	146,058	167,63763	167,63763
41	passengers_per_time_occupied	3,06729203	3,0173	2,97553	3,16671	3,26741	2,79331	2,58089	2,27662	2,93441	3,00632	3,44084	1,64381	3,37768	1,64181	0,9362391	0,9362391	0,9362391
42	passengers_per_time_diving	2,77975828	2,70573	2,77927	2,73599	2,92584	2,31025	2,11491	1,81657	1,87446	2,66725	2,71917	3,05785	1,21685	3,15243	1,18519	0,7884204	0,7884204
43	benetliche Effizienz (Strecke)	2,43558112	2,45797	2,51589	2,46236	2,62215	2,13734	1,95456	1,6753	1,1447	2,43692	2,45193	2,75933	1,15552	2,85885	1,12896	0,9765524	0,9765524
44	systemeffizienz (Strecke)	1,66181955	1,62476	1,72353	1,58207	1,70287	1,3821	1,53321	1,35734	1,05876	1,54674	1,63249	1,63639	1,02678	1,9482	1,0003	0,8165524	0,8165524
45	Ulmefaktor durchschritt (Strecke)	1,50171607	1,51282	1,45973	1,55641	1,53934	1,54688	1,27483	1,23148	1,07812	1,57552	1,44871	1,68565	1,12928	1,73453	1,12795	1,12795	1,12795
46	Ulmefaktor Zeit	1,914668886	1,87728	1,82089	1,89731	1,93564	1,81715	1,52304	1,49545	1,19776	1,9343	1,83672	2,1133	1,27254	2,14046	1,2684	1,2684	1,2684
47	Streckeffizienz (Zeit)	1,451822256	1,4418	1,52633	1,44203	1,5156	1,27136	1,38861	1,24468	0,9314	1,37893	1,48126	1,44688	0,95545	1,417278	0,9344	0,7884204	0,7884204
48	Leerkilometer Anteil an Gesamtkilometer	9,94793385	10,618	7,34724	14,2473	10,7836	17,8022	16,4638	20,5736	24,736	9,64163	10,235	10,3939	25,643	6,95178	27,1743	18,334766	18,334766

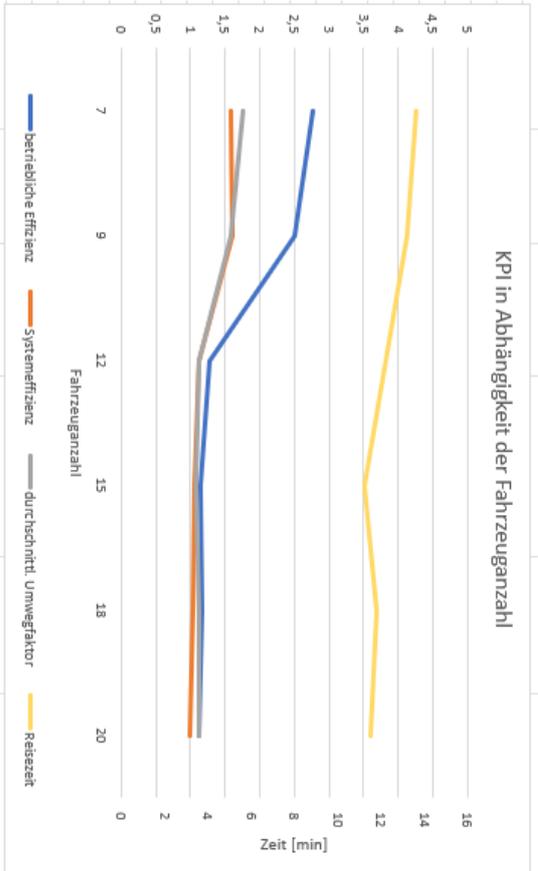
Abbildung 55: Auswertungstabelle der verschiedenen Szenarien Hohenegelesen/Baddeckenstedt (4)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
50	Scenario	Nachfrage	Fahrzeuganzahl	betriebliche Effizienz	Systemeffizienz	durchschm. Umwegfaktor	duration_ride_mean	KPI bei 10 Fahrzeuge						
51		10	2	1,40091	0,9555	1,3604	13,46964286							
52			5	1,52877	1,0065	1,4766	14,51666667							
53	HB2		10	1,24121	0,9289	1,2173	13,54074074							
54		20	2	2,90453	1,5057	1,7711	19,8675952							
55			5	1,96866	1,2554	1,4554	15,30283158							
56	HB4		10	1,89574	1,0888	1,6168	18,67777778							
57		30	5	1,7724	1,3221	1,3406	13,87823529							
58			10	2,2211	1,3089	1,6968	19,20254902							
59	HB5		40											
60			5	2,72343	1,4994	1,742	18,75045872							
61	HB6		10	2,53479	1,3402	1,7143	19,7771605							
62		50	10											
63			10	2,88275	1,6552	1,7405	19,85296296							
64	HB7		60											
65			5											
66			10	2,8918	1,6731	1,7283	20,82083333							
67	HB8		70											
68			10											
69			10	2,926	1,782	1,6419	18,845189							
70	HB9		80											
71			10											
72			10	2,8446	1,7471	1,6281	18,7467593							
73	HB10		90											
74			10											
75			10	2,6189	1,7333	1,5109	17,17965986							
76	HB11.1		90											
77			10											
78			10	2,9928	1,7385	1,6869	19,04817814							
79	HB11.2		100											
80			10											
81			10	2,9715	1,961	1,5152	18,56753086							
82	HB12		110											
83			10											
84			10	2,1655	1,6758	1,2928	15,52279152							
85	HB13		200											
86			20											
87														
88														
89														
90														
91														
92														
93														

Abbildung 56: Übersicht Konstante Fahrzeuganzahl Hohenegelesen/Baddeckenstedt



Nachfrage	Fahrzeuganzahl
10	2
30	5
50	7
70	8
100	10



Anzahl Fahrzeuge	HB9					
	7	9	12	15	18	20
betriebliche Effizienz	2,7731	2,5118	2,7832	1,141	1,159	1,128
Systemeffizienz	1,5761	1,5956	1,6815	1,058	1,027	1
durchschnittl. Umwegfaktor	1,7595	1,5741	1,6551	1,078	1,129	1,1279
Reisezeit	13,6510	13,1999	12,1961	11,2079	11,7817	11,4999

Abbildung 57: Übersicht KPI in einem Szenario Hohenegelesen/Baddeckenstedt

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.



Alt Wallmoden, 09.09.2022