

# **Einfluss verschiedener internationaler Verkehrsregelungen auf die Kapazität von zweistreifigen Kreisverkehren**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTOR-INGENIEURS**

von der KIT-Fakultät für  
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

**DISSERTATION**

von

**Jan Wachsmann M.Eng.**  
geb. in Nördlingen

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Oktober 2025  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jan Riel

Karlsruhe (2025)



# Kurzfassung

Kreisverkehre stellen eine elementare Knotenpunktform im europäischen Straßenraum dar. Der sogenannte ‚kleine Kreisverkehr‘ gilt in Bezug auf die Verkehrssicherheit als die sicherste Form eines plangleichen Straßenknotenpunkts und weist zudem in der Regel höhere Kapazitäten als andere vorfahrtsgeregelte Knotenpunktformen auf. Eine Ausprägung des ‚kleinen Kreisverkehrs‘ ist der ‚kleine zweistufig befahrbare Kreisverkehr‘, der die Kapazität eines einstufigen Kreisverkehrs durch eine zweistufig befahrbare Kreisfahrbahn und nach Bedarf durch zweistufige Zufahrten erhöht. International gibt es hierbei verschiedene Empfehlungen oder sogar gesetzliche Vorgaben zur Nutzung dieser zweistufigen Elemente (nachfolgend als Fahrweisen deklariert). Die vorliegende Arbeit geht der Frage nach, inwiefern diese Empfehlungen oder Vorgaben die Kapazität positiv beeinflussen.

Untersucht werden hierzu konkret zwei verschiedene Fahrweisen. Fahrweise 1 empfiehlt dabei die Nutzung des linken Fahrstreifens einer Zufahrt sowie des inneren Fahrstreifens der Kreisfahrbahn allein für die Linksabbiegeströme, während Fahrweise 2 die Nutzung des linken Fahrstreifens einer Zufahrt sowie des inneren Fahrstreifens der Kreisfahrbahn für alle Linksabbiegeströme und alle Geradeausströme vorschreibt.

Strombetrachtungen zeigen, dass die Fahrweise in der Theorie starke Auswirkungen auf die Verteilung der einzelnen Verkehrsströme auf die zweistufigen Elemente hat. Da die aktuell in den Richtlinien verankerten Berechnungsverfahren für zweistufige Kreisverkehre keine Möglichkeit bieten, diese Umverteilung von Verkehrsströmen zu berücksichtigen, werden zum einen alternative Berechnungsverfahren adaptiert und zum anderen eine Untersuchung mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation durchgeführt.

Berechnungen auf Basis des aus dem ‚Arbeitspapier Turbokreisverkehre‘ ([FGSV, 2015a]) auf ‚kleine zweistufig befahrbare Kreisverkehre‘ adaptierten Verfahrens weist darauf hin, dass diese Umverteilung starke Auswirkungen auf die Kapazität eines ‚kleinen zweistufig befahrbaren Kreisverkehrs‘ haben

kann. Beispielsweise zeigt sich eine Verringerung der Kapazität um 14 % bis 24 % bei Fahrweise 2 gegenüber der Fahrweise 1 in Abhängigkeit der Verteilung der Gesamtverkehrsstärke auf eine definierte Haupt- und eine definierte Nebenrichtung. Berechnungen nach dem Verfahren von WU & BRILON [2018] zeigen hingegen beispielsweise maximale Abweichungen von rund 6,5 %.

Im Rahmen der Untersuchung der Fragestellung mittels der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation wird eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, einzelne Fahrzeuge einem Verkehrsstrom zuzuordnen, die Bewegungslinien der Fahrzeuge (Trajektorien) zu analysieren und Bereiche des Kreisverkehrs zu identifizieren, an denen es zu verringerten Geschwindigkeiten kommt. Dies ermöglicht die Umverteilung in der Simulation der erfassten Verkehrsströme gemäß den Vorgaben der beiden betrachteten Fahrweisen und bietet neue Möglichkeiten zur Kalibrierung. Bei der Erstellung des Simulationsmodells und dessen Kalibrierung werden Problemstellen bzw. Einschränkungen der Modellierung beleuchtet, deren Auswirkungen diskutiert und Lösungsansätze aufgezeigt.

Im abschließenden Simulationsexperiment wird zum einen am Praxisbeispiel des ‚Pullacher Kreisels‘ untersucht, wie sich die Verkehrsqualität der im Rahmen der Verkehrsuntersuchung beobachteten Verkehrsabläufe bei Anwendung der Fahrweisen 1 und 2 verändert. Hierbei werden keine positiven Effekte einer strikt vorgegebenen Fahrweise festgestellt, auch nicht bei Steigerung der Verkehrsbelastung. Zum anderen wird im Simulationsexperiment systematisch untersucht, welche Kapazitäten bei Variation der Verteilung der Gesamtverkehrsbelastung auf eine definierte Haupt- und eine definierte Nebenrichtung theoretisch erreicht werden können. Fahrweise 2 weist hier zwischen 20 % und 28 % geringere Kapazitäten als Fahrweise 1 auf. Schlussendlich kann somit keine Empfehlung für feste Regelungen an zweistreifigen Kreisverkehren ausgesprochen werden, da keine Fahrweise eine eindeutig positive Beeinflussung der Kapazität mit sich bringt. Vielmehr bestätigen die Ergebnisse die in weiten Teilen der Welt vorhandene Freiheit bei der Fahrstreifenwahl.

# Abstract

Roundabouts are a fundamental form of junction in the European road network. In terms of road safety, they are considered to be the safest form of a road intersection and also generally have a higher capacity than other priority-ruled intersections. One type of roundabouts is the two-lane roundabout, which increases the capacity of a single-lane roundabout by adding a second circulating lane and, if required, two-lane approaches. Internationally, there are various recommendations or even legal requirements for the use of these two-lane elements (hereafter declared as driving patterns). This dissertation examines the extent to which these recommendations or requirements have a positive influence on capacity.

Specifically, two different driving patterns are analysed. Driving pattern 1 recommends the use of the left lane of an approach and the inner lane of the circulating lane for left-turning flows only, while driving pattern 2 prescribes the use of the left lane of an approach and the inner lane of the circulating lane for all left-turning flows and all straight-ahead flows.

Flow analyses show that, in theory, the driving pattern has a strong impact on the distribution of the individual traffic flows on the two-lane elements. As the calculation methods for two-lane roundabouts currently laid down in the guidelines do not offer the possibility of taking this redistribution of traffic flows into account, alternative calculation methods were adapted and an microsimulation analysis was carried out.

Calculations based on the method adapted from the German ‘*Arbeitspapier Turbokreisverkehre*’ [FGSV, 2015a] to two-lane roundabouts indicate that this redistribution can have a strong impact on the capacity of a two-lane roundabout. For example, a reduction in capacity of 14 % to 24 % is shown for pattern 2 compared to pattern 1, depending on the distribution of the total traffic volume to a defined major direction and a defined minor direction. Calculations according to the method by WU & BRILON [2018], on the other hand, show maximum deviations of around 6.5 %.

As part of the microscopic traffic flow simulation analysis, a methodology is being developed that makes it possible to assign individual vehicles to a traffic flow, analyse the lines of movement of the vehicles (trajectories) and identify areas of the roundabout where speeds are reduced. This enables the redistribution in the microscopic traffic flow simulation of the recorded traffic flows according to the specifications of the two driving patterns under consideration and offers new possibilities for calibration. During the preparation of the simulation model and its calibration, problem areas and limitations of the modelling are highlighted, their effects discussed and possible solutions identified.

In the final simulation experiment, the practical example of the German '*Pullacher Kreisel*' is used to investigate how the traffic quality of the traffic flows observed in the traffic study changes when driving patterns 1 and 2 are applied. No positive effects of a strictly prescribed driving pattern are observed, not even when the traffic load increases. Furthermore, the simulation experiment systematically investigates which capacities can theoretically be achieved by varying the distribution of the total traffic load between a defined major and a defined minor direction. Pattern 2 has between 20 % and 28 % lower capacities than pattern 1. Ultimately, no recommendation can be made for rigid regulations at two-lane roundabouts as no driving pattern has a clearly positive influence on capacity. Rather, the results confirm the freedom of lane choice that exists in many parts of the world.

# Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand zwischen 2017 und 2025. In dieser Zeit habe ich mehrere berufliche Stationen durchlaufen, das Thema meiner Dissertation war dabei ein steter Begleiter meiner Freizeit. Auf dem Weg zum Ziel gab es dabei mehrere Personen, ohne die der Weg nicht möglich gewesen wäre und denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Zunächst möchte ich den beiden Referenten Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch und Prof. Dr.-Ing. Jan Riel meinen Dank aussprechen. Professor Peter Vortisch möchte ich dafür danken, dass er mein Promotionsvorhaben am KIT ermöglicht und mich an markanten Wegpunkten in die richtige Richtung gelenkt hat. Professor Jan Riel danke ich insbesondere für die Betreuung seitens der Hochschule Karlsruhe (HKA), den fachlichen Austausch, die Diskussion von Ergebnissen, die eingeräumten Freiräume bei der Bearbeitung sowie seine Bemühungen um gute Promotionsbedingungen an der HKA.

Ein besonders großer Dank gilt meiner Ehefrau Amina, die mir über all die Jahre stets als treue Wegbegleiterin zur Seite stand und mich auch in schweren Zeiten dazu motivieren konnte weiterzumachen. Danke, dass du mir einen direkten (fachlichen) Austausch ermöglicht hast und mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden bist.

Zudem möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Christian Hollerböck bedanken, der mich einst dazu animiert hat, erste Schritte in der Forschung zu machen und bei Fragen zu meiner Dissertation gerne weitergeholfen hat. In diesem Zuge möchte ich mich auch bei Prof. Dr.-Ing. Markus Stöckner bedanken, der mich ebenfalls ermutigt hat, im wissenschaftlichen Bereich zu arbeiten. Danke, dass ihr stets an mich geglaubt habt.

Für das Zurverfügungstellen einer Softwarelizenz für „PTV Vissim“ möchte ich der PTV Group ganz herzlich danken, da meine Arbeit dadurch ermöglicht und erleichtert wurde.

Abschließend möchte ich meiner Familie und meinen Freunden meinen Dank aussprechen. Danke, dass ihr mich bei allen Entscheidungen in meinem Leben stets unterstützt habt.

Nun, nachdem das Ziel erreicht ist, möchte ich gerne Johann Wolfgang von Goethe zitieren: „*Niemand weiß, wie weit seine Kräfte gehen, bis er sie versucht hat.*“

Karlsruhe, im November 2025

Jan Wachsmann

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>i</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>iii</b>
<b>Vorwort und Danksagung .....</b>	<b>v</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>vii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>xii</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Fragestellung und Untersuchungszweck.....	3
1.3 Begriffsabgrenzung.....	3
1.4 Gliederung .....	4
<b>2 Zweistufige Kreisverkehre.....</b>	<b>5</b>
2.1 Zeitliche Entwicklung.....	5
2.2 Einsatzbereiche .....	7
2.2.1 Allgemein .....	7
2.2.2 Kriterien Kapazität und Qualität des Verkehrsablaufs .....	7
2.2.3 Weitere Kriterien.....	10
2.3 Verkehrsregelungen / Fahrweisen .....	12
2.3.1 Fahrweise 1.....	12
2.3.2 Fahrweise 2.....	15
2.3.3 Anwendung der Fahrweisen in der Europäischen Union ....	17
2.3.4 Abgrenzung der Fahrweise 2 zum einstreifigen Kreisverkehr mit Bypässen .....	18
<b>3 Theoretische Betrachtung der Fahrweisen.....</b>	<b>23</b>
3.1 Allgemeines .....	23
3.2 Konfliktpunkte.....	23
3.3 Strombetrachtungen.....	26
3.3.1 Bezeichnung von Strömen und Fahrstreifen.....	26

3.3.2	Einfluss der Fahrweise auf die Verteilung der Gesamtverkehrsstärke auf die jeweiligen Querschnitte .....	28
3.4	Folgerungen und offene Fragen.....	33
<b>4</b>	<b>Methoden zur Ermittlung der Kapazität.....</b>	<b>36</b>
4.1	Begriffsbestimmung .....	36
4.2	Kapazitätsgrundformeln .....	38
4.3	Weiterentwicklung der Kapazitätsgrundformeln .....	43
4.4	Kapazitätsformeln für Kreisverkehre.....	45
4.5	Aktuelle Forschungsergebnisse .....	57
4.6	Anwendung alternativer Verfahren .....	64
<b>5</b>	<b>Mikroskopische Verkehrsflusssimulation .....</b>	<b>66</b>
5.1	Wahl der Simulationssoftware.....	66
5.2	Kapazität in ‚PTV Vissim‘ .....	66
5.2.1	Unterschiede zwischen HBS und ‚PTV Vissim‘ .....	66
5.2.2	Einsatzgrenzen der Software .....	67
5.3	Kapazitätsanalyse in ‚PTV Vissim‘ .....	69
<b>6</b>	<b>Verkehrsuntersuchung.....</b>	<b>78</b>
6.1	Allgemeines .....	78
6.2	Erstellung der Videoaufnahmen .....	85
6.3	Knotenpunktzählung.....	87
6.4	Vergleiche zu den Fahrweisen 1 und 2 .....	91
6.4.1	Linksabbiegeströme.....	92
6.4.2	Geradeausströme .....	94
6.4.3	Rechtsabbiegeströme.....	95
6.5	Erstellung der Trajektorien .....	97
6.6	Erkenntnisse.....	105
6.6.1	Fahrzeuge auf den rechten Fahrstreifen der zweistreifigen Zufahrten .....	106
6.6.2	Fahrzeuge auf den linken Fahrstreifen der zweistreifigen Zufahrten .....	109
6.6.3	Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten .....	110
6.7	Zusammenfassung der Beobachtungen.....	112

---

<b>7</b>	<b>Verkehrsmodell.....</b>	<b>115</b>
7.1	Allgemeines .....	115
7.2	Vorbereitung .....	117
7.2.1	Inhalte des Arbeitsschrittes.....	117
7.2.2	Festsetzungen .....	117
7.2.3	Eingangsdaten .....	118
7.3	Initialisierung.....	118
7.3.1	Inhalte des Arbeitsschrittes.....	118
7.3.2	Überlegungen zum Aufbau des Basismodells .....	119
7.3.3	Methodik der Plausibilitätsprüfung .....	127
7.3.4	Auswertungen aus Vissim .....	129
7.3.5	Erzeugung und Vergleich der Trajektorien in QGIS .....	130
7.3.6	Erstellung und Prüfung des Basismodells .....	133
7.4	Kalibrierung und Validierung.....	141
7.4.1	Inhalte der Arbeitsschritte .....	141
7.4.2	Allgemeines.....	144
7.4.3	Methodik der Kalibrierung .....	157
7.4.4	Durchführung der Kalibrierung .....	161
7.4.5	Durchführung der Validierung .....	205
7.5	Fazit .....	221
<b>8</b>	<b>Simulationsexperiment.....</b>	<b>223</b>
8.1	Änderung der Verkehrsqualität bei Anwendung unterschiedlicher Fahrweisen.....	223
8.2	Steigerung der Verkehrsbelastung .....	227
8.3	Systematische Kapazitätsermittlung .....	234
8.3.1	Methodik .....	234
8.3.2	Ergebnisse .....	241
8.4	Zusammenfassung und Interpretation des Simulationsexperiments ... .....	244
<b>9</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>248</b>
9.1	Methodik.....	248
9.2	,PTV Vissim‘ .....	249
9.3	Kapazität .....	250

9.4 Ausblick.....	251
<b>Genutzte Hilfsmittel .....</b>	<b>252</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>253</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>271</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>277</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>286</b>
<b>Anhangsverzeichnis.....</b>	<b>287</b>
Anhang 1 Berechnungen nach WU & BRILON [2018].....	288
Anhang 2 Ergebnisse der Knotenpunktzählung .....	297
Anhang 3 Vergleich der Knotenpunktzählung mit den Fahrweisen 1 und 2 .....	301
Anhang 4 Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten (Verkehrs- untersuchung) .....	316
Anhang 5 Übergabe der Fahrzeugzuflüsse und Fahrzeugrouten an ,PTV Vissim‘ .....	323
Anhang 6 Ergebnisse des Simulationsexperiments zu Kapitel 8.1 und 8.2. ....	327



## Abkürzungsverzeichnis

4K	horizontale Bildauflösung von rund 4000 Pixeln
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.
EU	Europäische Union
FaktSichAbst	Faktor Sicherheitsabstand
FFE	Fahrer-Fahrzeug-Einheit(en)
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
fps	Frames per second
FW	Fahrweise
Fz	Fahrzeug
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HCM	Highway Capacity Manual
HR	Hauptrichtung
IQR	Interquartilsabstand
K1, K2, K3, K4	Querschnitt 1, 2, 3 oder 4 der Kreisfahrbahn
KBS	Koordinatenbezugssystem
KV	Kreisverkehr
LA	Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen einer Zufahrt
LSA	Lichtsignalanlage

---

LüVornStd	Mindestzeitlücke – Lücke vorn (Standard)
LüHintStd	Mindestzeitlücke – Lücke hinten (Standard)
MAD	Mean Absolute Deviation – durchschnittliche absolute Abweichung
MaxGeschw	maximale Geschwindigkeit, welche ein Fahrzeug des bevorrechtigten Stroms noch haben darf, damit es als störendes Fahrzeug erkannt wird“ [PTV Group, 2024]
MinWegl	Mindestweglänge
MinZeitl	Mindestzeitlücke
MW	Mittelwert
NK	Netzknoten
NR	Nebenrichtung
OSM	Open Street Map
px	Pixel
q <sub>ges</sub>	Gesamtverkehrsstärke
q <sub>K</sub>	Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn
q <sub>Z</sub>	Verkehrsstärke in der Zufahrt
QSV	Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs nach dem HBS
RA	Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen einer Zufahrt
RMSE	Root Mean Square Error – Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
StauLngmax	Staulänge (Maximum)

## Abkürzungsverzeichnis

---

StVG	Straßenverkehrsgesetz
StVO	Straßenverkehrsordnung
SV	Fahrzeuge des Schwerverkehrs
UK	United Kingdom (Vereinigtes Königreich Großbritannien und Nordirland)
VehDelay	Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert)
vWunsch	Wunschgeschwindigkeitsverteilung
Z1, Z2, Z3, Z4	Zufahrt 1, 2, 3, 4





# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Kreisverkehre sind eine Form der ‚plangleichen Knotenpunkte‘ im Straßenverkehr. Ein ‚Knotenpunkt‘ ist definiert als „*bauliche Anlage, die der Verknüpfung von Verkehrs wegen dient*“ [FGSV, 2020a]. Wird dabei der Verkehr auf einer Ebene abgewickelt, wird der Knotenpunkt als ‚plangleich‘ bezeichnet. Beim Kreisverkehr werden die Knotenpunktarme über eine ringförmige Fahrbahn (Kreisfahrbahn) verbunden, diese wird (bei Rechtsverkehr) entgegen dem Uhrzeigersinn befahren und ist dem Verkehr in den Knotenpunktarmen gegenüber bevorrechtigt. [FGSV, 2020a] Als typische Ausbildung dieser Knotenpunktform kann der ‚kleine Kreisverkehr mit einstreifiger Kreisfahrbahn‘ angesehen werden, der sowohl seitens der Baulastträger als auch von Seiten der Verkehrsteilnehmer eine hohe Akzeptanz aufweist und mittlerweile ein Standardelement im Straßenraum darstellt. [WACHSMANN, 2016]

Die Wahl der Knotenpunktform hängt nach FGSV [2007] von den Kriterien soziale Brauchbarkeit, Straßenraumgestaltung, Umfeldverträglichkeit, Verkehrsablauf, Verkehrssicherheit und Wirtschaftlichkeit ab. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Kriterium Verkehrsablauf, wofür die sogenannte Kapazität (früher: Leistungsfähigkeit) bzw. der Auslastungsgrad einen gängigen Vergleichswert darstellt. Die Kapazität des ‚kleinen Kreisverkehrs mit einstreifiger Kreisfahrbahn‘ liegt dabei im Allgemeinen über der Kapazität von vorfahrtsgeregelten Knotenpunkten und unterhalb der Kapazität von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage. [SCHNABEL et al., 2011] Der ‚Auslastungsgrad‘ gibt hingegen das Verhältnis von vorhandener Verkehrsstärke zur Kapazität an. [FGSV, 2015b]

Neben dem ‚kleinen Kreisverkehr mit einstreifiger Kreisfahrbahn‘ gibt es weitere Knotenpunktformen, die sich an den jeweiligen Einsatzzwecken orientieren. Als kleinere Form mit geringerer Kapazität gilt der sogenannte

,Minikreisverkehr‘, der eine überfahrbare Mittelinsel aufweist und an dieser Stelle lediglich der Vollständigkeit halber aufgeführt wird. Eine Form des Kreisverkehrs mit höherer Kapazität ist insbesondere in den Niederlanden sehr beliebt, der sogenannte ,Turbokreisverkehr‘. Dieser ist abschnittsweise mehrstreifig und zeichnet sich dadurch aus, dass durch die Verkehrsteilnehmenden keine Fahrstreifenwechsel auf der Kreisfahrbahn vorzunehmen sind, um die jeweilige Kreisausfahrt zu erreichen. [FGSV, 2015a]

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht der ,kleine Kreisverkehr mit zweistreifig befahrbarer Fahrbahn‘. Dieser weist eine konzentrische Kreisfahrbahn auf, die nach aktuellem Stand des Wissens einstreifig markiert sein sollte und mit zweistreifigen Zufahrten in einem oder mehreren Knotenpunktarmen ausgeführt werden kann. Auch dieser weist eine höhere Kapazität als das einstreifige Pendant auf [FGSV, 2006b], einhergehend mit einer zunehmenden Komplexität der Verkehrsabläufe und potenziellen Fahrstreifenwechseln auf der Kreisfahrbahn.

Zwingend davon abzugrenzen ist der ,große Kreisverkehr‘. Dieser weist einen Außendurchmesser von mehr als 60 m auf und ist in der Regel signalisiert. [FGSV, 2020a] Er folgt damit generell anderen Prinzipien. Wird im Weiteren der Ausdruck ,Kreisverkehr‘ benutzt, so ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit der ,kleine Kreisverkehr‘ zu verstehen, anderenfalls wird explizit darauf hingewiesen.

In Deutschland sind derzeit lediglich Kreisverkehre mit zweistreifig befahrbaren Elementen vorgesehen [FGSV, 2006b], im Ausland sind hingegen auch Kreisverkehre mit mehr als zwei Fahrstreifen anzutreffen. Auch finden sich im Ausland teils eindeutige Regeln und Gesetze, wie diese zu befahren sind. Seitens der deutschen Straßenverkehrsordnung (StVO) ist hingegen lediglich festgesetzt, dass der Verkehr auf der Kreisfahrbahn grundsätzlich Vorfahrt gegenüber dem Verkehr der Zufahrten hat. [StVO, 2013]

## 1.2 Fragestellung und Untersuchungszweck

Die vorliegende Arbeit soll die Fragestellung beantworten, wie und in welchem Maße sich verschiedene Verkehrsregelungen, im Weiteren als ‚Fahrweisen‘ bezeichnet, an zweistreifigen Kreisverkehren auf deren Kapazität auswirken.

Neben einer möglichst umfassenden Gesamtbetrachtung der Fragestellung soll im Fokus der Bearbeitung die Untersuchung der Fragestellung mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation stehen. An einem praktischen Beispiel sollen zudem die Einsatzgrenzen der Simulationssoftware ‚PTV Vissim‘ zur systematischen Analyse der Kapazität sowie der Qualität des Verkehrsablaufs dargestellt werden.

Es ist zu erwarten, dass die Kapazität zweistreifig befahrbarer Kreisverkehre bei Anwendung verschiedener Verkehrsregelungen bzw. Fahrweisen variiert. Dadurch eröffnet sich eine Perspektive, ohne baulichen Eingriff den Verkehrsablauf an bestehenden Anlagen durch Anpassung der (nationalen) Verkehrsregeln zu verbessern. Damit zielt die Arbeit auf eine Empfehlung für eine einheitliche europäische Verkehrsregelung an zweistreifigen Kreisverkehren ab.

## 1.3 Begriffsabgrenzung

Das deutsche Regelwerk sieht für zweistreifig befahrbare Kreisfahrbahnen keine Markierung der einzelnen Fahrstreifen vor. Dennoch sind in der Praxis zahlreiche Beispiele mit Markierung der Fahrstreifen zu finden. Im folgenden wird unabhängig vom Vorhandensein einer Markierung der Fahrstreifen der Begriff ‚zweistreifiger Kreisverkehr‘ verwendet. Dieser umfasst alle konzentrischen, zweistreifig befahrbaren, kleinen Kreisverkehre.

Zweistreifige Kreisverkehre können mit ein- oder zweistreifigen Zufahrten ausgestattet sein. Um Missverständnisse auszuschließen, werden im Zusammenhang mit der Kreisfahrbahn die Begriffe ‚innen‘ und ‚außen‘ verwendet,

im Zusammenhang mit den Zufahrten die Begrifflichkeiten ‘links’ und ‘rechts’. [WACHSMANN, 2016]

## 1.4 Gliederung

Die Arbeit gliedert sich grob in einen rein theoretischen Teil (Kapitel 2 bis 5) und einen praktisch geprägten Teil (Kapitel 6 ff.). Zu Beginn wird in Kapitel 2 ein Überblick über die Einsatzbereiche von zweistufig befahrbaren Kreisverkehren gegeben sowie eine umfassende Betrachtung der gängigen Fahrweisen und Vorschriften in Europa durchgeführt. Die aus der Recherche exzerpierten Fahrweisen werden dann einer theoretischen Betrachtung (Kapitel 3) zur Ermittlung der Unterschiede und potenziellen Auswirkungen auf den Verkehrsablauf unterzogen. Kapitel 4 beinhaltet einen Überblick über potenzielle händische Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Kapazität und der Kapazitätsunterschiede zwischen den Fahrweisen. Die Erkenntnisse werden anhand von Beispielrechnungen überprüft und die ‘mikroskopische Verkehrsflusssimulation’ als alternatives Berechnungsverfahren in Grundzügen vorgestellt sowie auf die Besonderheiten und Einsatzgrenzen eingegangen.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den vorigen Kapiteln erfolgt ab Kapitel 6 die Untersuchung anhand eines praktischen Beispiels. Hierzu wird in Kapitel 6 die zugrunde liegende Verkehrsuntersuchung beschrieben sowie die Auswertungsergebnisse diskutiert. Diese bildet die Grundlage für das Verkehrsmodell in ‘PTV Vissim’, dessen Aufbau, Initialisierung, Kalibrierung und Validierung umfassend beschrieben werden (Kapitel 7). In dem abschließenden Simulationsexperiment (Kapitel 8) wird überprüft, inwiefern Auswirkungen aus den betrachteten Fahrweisen auf die Kapazität mithilfe der ‘mikroskopischen Verkehrsflusssimulation’ zu erkennen sind. Die Arbeit schließt mit einem Fazit und einem Ausblick ab (Kapitel 9).

## 2 Zweistufige Kreisverkehre

### 2.1 Zeitliche Entwicklung

Die ersten Kreisverkehre, die aus verkehrstechnischen Gründen gebaut wurden, sind auf das Jahr 1907 zu datieren. Anfangs konnte der Verkehr ohne Festsetzung von Vorfahrtsregelungen abgewickelt werden, jedoch stiegen nach Ende des Zweiten Weltkriegs der Motorisierungsgrad und das Verkehrsaukommen stark an. Selbstblockaden der Kreisverkehre waren die Folge, sodass eine Regelung des Verkehrs durch Lichtsignalanlagen oder die Polizei notwendig wurde. Bereits früh führten verkehrstechnische Versuche zu der Erkenntnis, dass sich die o. g. Problematik durch das Erteilen der Vorfahrt für die Kreisfahrbahn lösen ließ. Ende der 1960er-Jahre hingegen wurde die ‚rechts vor links‘-Regel an Kreisverkehren im Zuge der UNO-Konferenz für den Straßenverkehr beschlossen, an die sich der Großteil, jedoch nicht alle der Länder (z. B. Deutschland) hielt. Über die Jahre setzte sich dann jedoch weltweit wieder die Regelung durch, den Verkehr im Kreis zu bevorrechtigen, was sich positiv sowohl auf die Leistungsfähigkeit als auch auf die Sicherheit auswirkte. [STUWE, 1992]

Nachdem in den 1970er- und 1980er-Jahren der Knotenpunkttyp ‚Kreisverkehr‘ in Deutschland im Gegensatz zu anderen Ländern aus dem Fokus der Verkehrsplaner gerückt war, erlebte dieser Anfang der 1990er-Jahre eine Renaissance. [STUWE, 1992] Mit dieser Wiederentdeckung wurde es jedoch notwendig, Entscheidungstragenden und Verkehrsplanenden geeignete Berechnungsverfahren an die Hand zu geben [STUWE, 1992], weshalb es seither eine Vielzahl an Forschungsvorhaben, Veröffentlichungen und Richtlinien gibt, die sich mit dieser Thematik beschäftigen. Bereits in den 1980er- wurde erkannt, dass das individuelle Verhalten der Verkehrsteilnehmenden (Grundeinstellung, Beachtung der Verkehrsregeln, Erfahrung mit Kreisverkehren etc.) in verschiedenen Ländern unterschiedlich ist und sich in den jeweiligen Berechnungsmethoden wiederfindet. Jahren [BRILON, 1988] Dies führt zwar zu einer Vielzahl an Berechnungsmethoden, die aber generell einem ähnlichen Ansatz folgen.

Heutzutage ist der Knotenpunkttyp ‚Kreisverkehr‘ weltweit verbreitet und akzeptiert. Abbildung 1 zeigt einen qualitativen Überblick über die Verbreitung von Kreisverkehren in Europa. Diese umfasst eine Vielzahl verschiedener Untertypen/Ausprägungen des Typs ‚Kreisverkehr‘, eine Unterteilung in die verschiedenen Typen kann anhand der OpenStreetMap-Abfrage nicht erfolgen. Es ist jedoch festzuhalten, dass in weiten Teilen Europas eine hohe Dichte an Kreisverkehren zu verzeichnen ist.

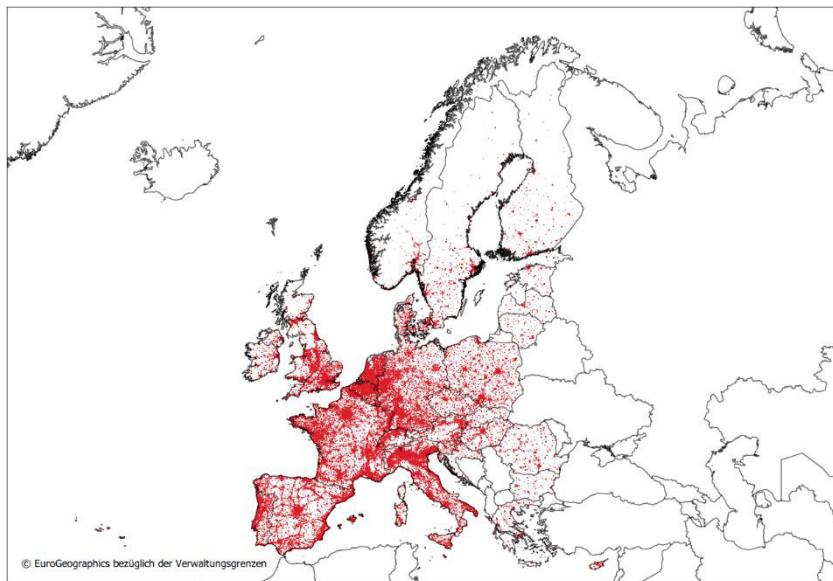


Abbildung 1: Qualitativer Überblick über die Verbreitung von Kreisverkehren in Europa,  
Kartengrundlage: [EUROSTAT, 2018] Datengrundlage: [OpenStreetMap Foundation, 2020]

## 2.2 Einsatzbereiche

### 2.2.1 Allgemein

Generell können verschiedene Kreisverkehrstypen an nahezu jedem plangleichen Knotenpunkt zum Einsatz kommen. Wie bei jeder Verkehrsanlage sind dabei verschiedene Kriterien bei der Wahl des geeigneten Knotenpunkttyps gegeneinander abzuwägen. Dem Kriterium Kapazität kommt dabei für die vorliegende Fragestellung eine zentrale Rolle zu. Dieses wird im folgenden Kapitel diskutiert, weitere Kriterien in Kapitel 2.2.3.

### 2.2.2 Kriterien Kapazität und Qualität des Verkehrsablaufs

Wie in Kapitel 1.1 erläutert, liegt die Kapazität des kleinen Kreisverkehrs im Allgemeinen über der Kapazität von vorfahrtsgeregelten Knotenpunkten und unterhalb der Kapazität von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage. [SCHNABEL et al., 2011] Dies sind grobe Anhaltswerte, harte Grenzen lassen sich für diese Einteilung nicht bestimmen, da alle Knotenpunkttypen unter anderem auf die jeweils vorherrschende Verteilung der Verkehrs nachfrage angepasst werden und die Kapazität keine feste Größe ist. Eine Einordnung verschiedener Kreisverkehrstypen erfolgt bei SCHNABEL et al. [2011] nicht.

In Abbildung 2 sowie in Abbildung 3 ist eine Klassifizierung verschiedener Kreisverkehrstypen nach deren Außendurchmesser und Kapazität (bezogen auf den Durchschnittlichen Täglichen Verkehr (DTV) in Kfz/24 h) bezogen auf ihr bauliches Umfeld dargestellt. Wie zu erkennen ist, sind die Obergrenzen der Kapazität identisch, jedoch unterscheiden sich die Angaben zu den Außenmessern, sowohl Ober- als auch Untergrenzen sind außerhalb bebauter Gebiete höher. Dies liegt darin begründet, dass außerhalb bebauter Gebiete die Geschwindigkeiten höher sind und größere Kreisinseln notwendig werden, um „... eine zügigere Befahrbarkeit sicher zu stellen, eine größere und damit besser erkennbare Kreisinsel zu erhalten sowie eine wirksame Ablenkung der geradeaus fahrenden Kraftfahrzeuge zu gewährleisten“ [FGSV, 2006b]. Diese

Erfordernis aus fahrdynamischen Gründen wirkt sich demnach auch auf den Flächenbedarf aus.

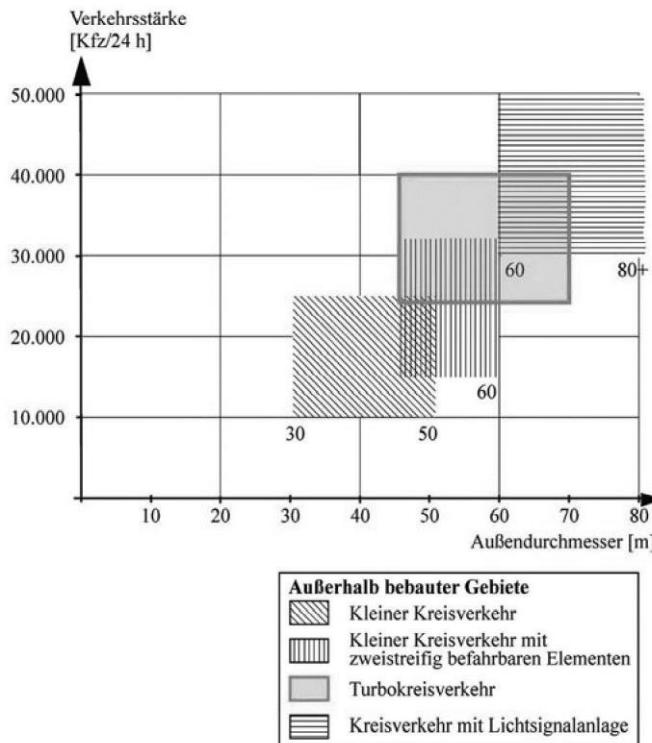


Abbildung 2: Orientierungswerte für die Kapazität von Kreisverkehren außerhalb bebauter Gebiete [FGSV, 2015a]

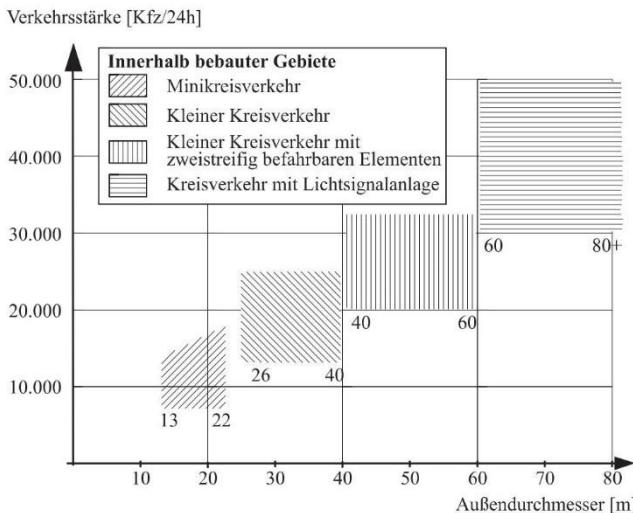


Abbildung 3: Orientierungswerte für die Kapazität von Kreisverkehren innerhalb bebauter Gebiete [FGSV, 2006b]

Aus beiden Abbildungen wird ersichtlich, dass der „zweistufige Kreisverkehr“ eine um bis zu 30 % höhere Kapazität aufweisen kann als das einstreifige Pendant. Die Kapazitätswerte außerhalb bebauter Gebiete entsprechen denen innerhalb bebauter Gebiete.

Es ist ebenfalls zu erkennen, dass sich die Kapazitätsbereiche des Typs „Turbokreisverkehrs“ und des Typs „zweistufiger Kreisverkehr“ überschneiden. Per Definition handelt es sich beim sogenannten „Turbokreisverkehr“ um „... einen kreisförmigen Knotenpunkt mit variabler Anzahl von Fahrstreifen im Kreis“ [BRILON & GEPPERT, 2015c] bzw. einen „... (abschnittsweise) mehrstreifigen Kreisverkehr, bei dem durch Vorsortierung in den Kreiszufahrten und Ansetzen neuer Fahrstreifen an der Innenseite der Kreisfahrbahn Fahrstreifenwechsel auf der Kreisfahrbahn vermieden und Fahrwegüberschneidungen in den Kreisausfahrten verhindert werden sollen“ [FGSV, 2015a]. Die in Abbildung 2 ersichtliche Kapazität für „Turbokreisverkehre“ lässt auf den ersten Blick den Schluss zu, dass „Turbokreisverkehre“ den

zweistreifigen Kreisverkehren kapazitätstechnisch überlegen sind. Dies ist jedoch insofern zu pauschal, als es die zugrunde liegende Aufteilung der Verkehrs nachfrage auf die verschiedenen Ströme außer Acht lässt. Der Typ ‚Turbo kreisverkehr‘ eignet sich insbesondere dann, wenn starke Geradeaus- oder Linksabbiegeströme vorliegen, der Typ ‚zweistreifiger Kreisverkehr‘ vor allem dann, „... wenn sich die Verkehrs nachfrage eher gleichmäßig über die Ströme am Knotenpunkt aufteilt ...“. [BRILON & GEPPERT, 2015a]

### 2.2.3 Weitere Kriterien

Neben der Kapazität und der Qualität des Verkehrsablaufs gelten auch die nachfolgenden Kriterien als entscheidungsrelevant für die Wahl und Gestaltung eines Knotenpunkts. Diese Kriterien werden im Rahmen dieser Arbeit nur teilweise an geeigneter bzw. relevanter Stelle berücksichtigt.

#### Verkehrssicherheit

Generell ist das Thema Verkehrssicherheit das entscheidendste Kriterium einer Verkehrsanlage. Diesbezüglich stellt der ‚einstreifige Kreisverkehr‘ die beste plangleiche Lösung dar. [BRILON & GEPPERT, 2015c] ‚Turbo kreisverkehre‘ weisen nach FGSV [2015a] ein ähnlich hohes Sicherheitsniveau auf, ‚zweistreifige Kreisverkehre‘ tendenziell ein schlechteres. Insbesondere Unfälle mit Personenschäden sind an Kreisverkehren selten. Dies liegt einerseits an den reduzierten Geschwindigkeiten im Knotenpunktbereich, andererseits daran, dass es deutlich weniger Konfliktpunkte im Vergleich zu einer Kreuzung gibt. [FGSV, 2006b]

#### Straßenraum

Die Wahl von Straßenquerschnitt und Knotenpunkttyp beeinflusst den öffentlichen Raum. Kreisverkehre können dabei die städtebauliche Bedeutung eines Platzes hervorheben. [FGSV, 2006b]

## Orientierung

Die Orientierung spielt nicht nur am Knotenpunkt und dessen Umfeld eine wichtige Rolle. Hier ist insbesondere die Begreifbarkeit der Verkehrsführung, die Wahrnehmung der Wegweisung und die damit verbundene Vorsortierung vor dem Knotenpunkt von Relevanz. Des Weiteren können einzelne Knotenpunkte wichtige Bezugspunkte im Netz darstellen. [FGSV, 2006b]

## Befahrbarkeit

Für die Befahrbarkeit von plangleichen Knotenpunkten ist die Fahrgeometrie das ausschlaggebende Kriterium. Die Befahrbarkeit wird dabei in der Regel durch Schleppkurven nachgewiesen. [SCHNABEL et al., 2011]

## Umweltverträglichkeit

Lärm- und Schadstoffemissionen beeinflussen das Umfeld und die Umwelt auch im Bereich von Knotenpunkten im Betrieb. Mögliche Faktoren für den Umfang der Emissionen sind hier die gefahrenen Geschwindigkeiten, die notwendigen Haltevorgänge und die Wartezeiten. [FGSV, 2006b]

Grundsätzlich sollte eine Abwägung bzgl. des Flächenbedarfs, aber auch der versiegelten Fläche der verschiedenen Knotenpunkttypen erfolgen. [FGSV, 2006b]

## Akzeptanz

Die Akzeptanz eines Knotenpunkts/Knotenpunkttyps hängt davon ab, ob der Verkehrsablauf aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden als „... sicher, angenehm und stetig ... mit geringen Wartezeiten .. [empfunden wird]“ [FGSV, 2006b].

## Anforderungen des Fuß- und Radverkehrs

Die Anforderungen des Radverkehrs betreffen einerseits die Führung im Knotenpunkt, andererseits die Querungsstellen an den Knotenpunktarmen. Für den Fußverkehr ist insbesondere die Kürze der Wege um den Knotenpunkt sowie

die Ausbildung der Querungsstellen von Relevanz. [FGSV, 2015a] Aufgrund dieser Belange sind nicht alle Knotenpunkttypen wählbar, wenn Fuß- und Radverkehr Berücksichtigung finden muss.

### **Flächenverfügbarkeit**

Wie bereits unter Kapitel 2.2.2 hergeleitet gibt es Vorgaben für die Größe von Kreisverkehren (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3). Insbesondere innerhalb bebauter Gebiete kann die Flächenverfügbarkeit stark begrenzt sein und die Wahl des Knotenpunkttyps beeinflussen.

### **Baulicher Aufwand**

Das Kriterium ‚Baulicher Aufwand‘ wird in FGSV [2015a] aufgeführt, jedoch nicht erläutert. Dies ist dahingehend zu interpretieren, dass geprüft werden muss, ob der bauliche Aufwand (Kosten) den Nutzen rechtfertigt, der Bau der Anlage also wirtschaftlich ist.

## **2.3 Verkehrsregelungen / Fahrweisen**

Zentrales Thema der hier bearbeiteten Fragestellung ist, ob und wie sich verschiedene Verkehrsregelungen (im folgenden als ‚Fahrweisen‘ deklariert) auf die Kapazität von zweistufigen Kreisverkehren auswirken. Nach internationaler Recherche zu Verkehrsregelungen an zweistufigen Kreisverkehren kommen für die Betrachtung lediglich zwei unterschiedliche Fahrweisen infrage, die in verschiedenen Ländern teils als Gesetz, teils als Empfehlung Anwendung finden, vgl. Kapitel 1.1. Weitere grundlegend unterschiedliche Fahrweisen sind für zweistufige Kreisverkehre zumindest in der Theorie nicht denkbar, wohingegen sich in der Praxis aller Wahrscheinlichkeit nach eine Vielzahl von Zwischenstufen finden werden.

### **2.3.1 Fahrweise 1**

Fahrweise 1 findet beispielsweise in Deutschland, Frankreich und der Schweiz Anwendung, aufgrund fehlender gesetzlicher Vorgaben als Empfehlungen der

dort ansässigen Automobilclubs. [ACS, o.D.; ADAC, 2005; APR, 2017] Zwei Darstellungen der genannten Empfehlungen finden sich in Abbildung 4 und zeichnen sich durch folgende Kernaussagen bzw. Anweisungen aus:

- Soll die Kreisfahrbahn an der ersten oder zweiten Ausfahrt verlassen werden, soll der rechte Fahrstreifen der (zweistreifigen) Zufahrt gewählt und der äußere Fahrstreifen der Kreisfahrbahn benutzt werden.
- Soll die Kreisfahrbahn an einer weiter entfernten Ausfahrt verlassen werden, soll der linke Fahrstreifen der (zweistreifigen) Zufahrt gewählt und der innere Fahrstreifen der Kreisfahrbahn benutzt werden.

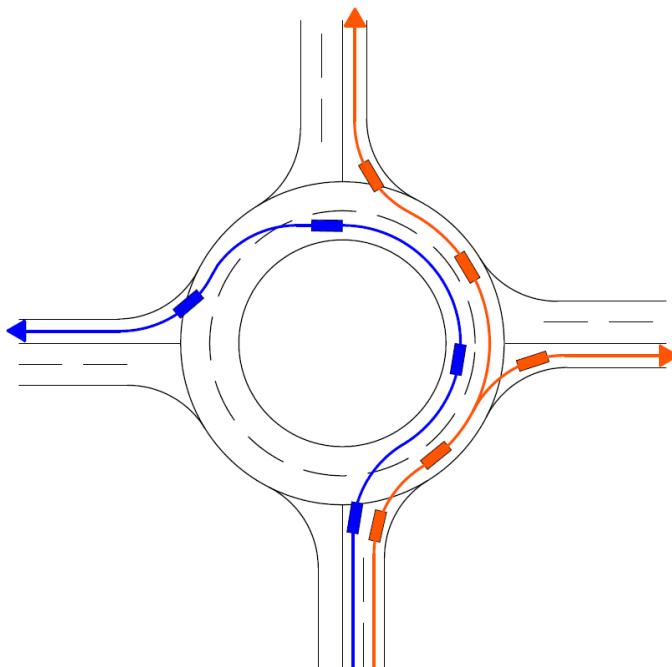


Abbildung 4: Empfehlungen des ADAC bzw. der Association Prévention Routière, nach [ADAC, 2005; APR, 2017]

In Großbritannien wird diese Fahrweise in der dort gültigen Straßenverkehrsordnung „The Highway Code“ vorgeschrieben. Hier wird ergänzend zur Vorgabe der Fahrstreifennutzung zudem die Nutzung des Fahrtrichtungsanzeigers in den Zufahrten und der Kreisfahrbahn vorgegeben [Vereinigtes Königreich Großbritannien und Nordirland, 2019]. Die Nummerierung der folgenden Aufzählung bezieht sich auf die Nummerierung in Abbildung 5.

- (1) Ist das Ziel die erste Ausfahrt, so muss sich die verkehrsteilnehmende Person in der Zufahrt links einordnen und den linken Fahrtrichtungsanzeiger nutzen.
- (2) Bei Benutzung der rechten Ausfahrt oder bei Umrundung des Kreisverkehrs hat sich die verkehrsteilnehmende Person in der Zufahrt rechts einzuordnen und den rechten Fahrtrichtungsanzeiger zu nutzen. Auf der Kreisfahrbahn hält sich die verkehrsteilnehmende Person rechts, bis ein Fahrstreifenwechsel erfolgen muss, um den Kreisverkehr zu verlassen. Wenn die Ausfahrt vor der gewünschten Ausfahrt passiert wurde, muss der linke Fahrtrichtungsanzeiger betätigt werden.
- (3) Soll eine Ausfahrt dazwischen angesteuert werden, so ist der „adäquate“ Fahrstreifen in der Zufahrt und auf der Kreisfahrbahn zu wählen, eine Nutzung des Fahrtrichtungsanzeigers ist nicht notwendig, bis der Kreisverkehr verlassen wird.

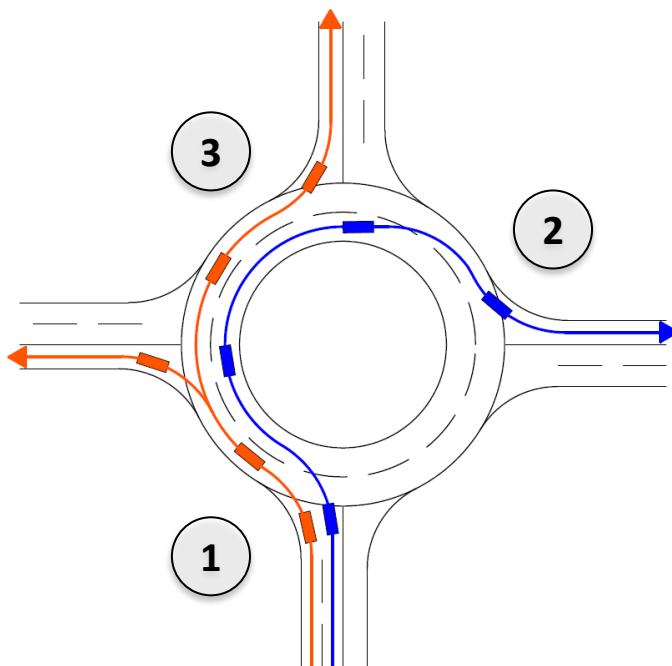


Abbildung 5: Darstellung der Regelungen an mehrstreifigen Kreisverkehren in Großbritannien, nach [Vereinigtes Königreich Großbritannien und Nordirland, 2019]

### 2.3.2 Fahrweise 2

Fahrweise 2 ist beispielsweise in der portugiesischen Straßenverkehrsordnung „Código de Estrada“ vorgeschrieben, in Spanien wird diese empfohlen. Die Fahrweise 2 ist in Abbildung 6 dargestellt und beinhaltet folgende Vorgaben [Republik Portugal, 2016]:

- Soll die Kreisfahrbahn an der ersten Ausfahrt verlassen werden, muss der rechte Fahrstreifen der (zweistreifigen) Zufahrt gewählt werden. Es darf nur der äußere Fahrstreifen der Kreisfahrbahn benutzt werden.

- Beim Verlassen des Kreisverkehrs über irgendeine der anderen Ausfahrten muss die verkehrsteilnehmende Person den rechten Fahrstreifen benutzen, nachdem die vorherige Ausfahrt passiert wurde, die unmittelbar vor der Ausfahrt liegt, über die der Kreisverkehr verlassen werden soll.

In Portugal haben Gespanne, Lkw und Fahrräder die Erlaubnis, durchgängig den rechten Fahrstreifen zu benutzen. Diese müssen aber anderen Verkehrsteilnehmenden die Ausfahrten zugänglich machen. [Republik Portugal, 2016]

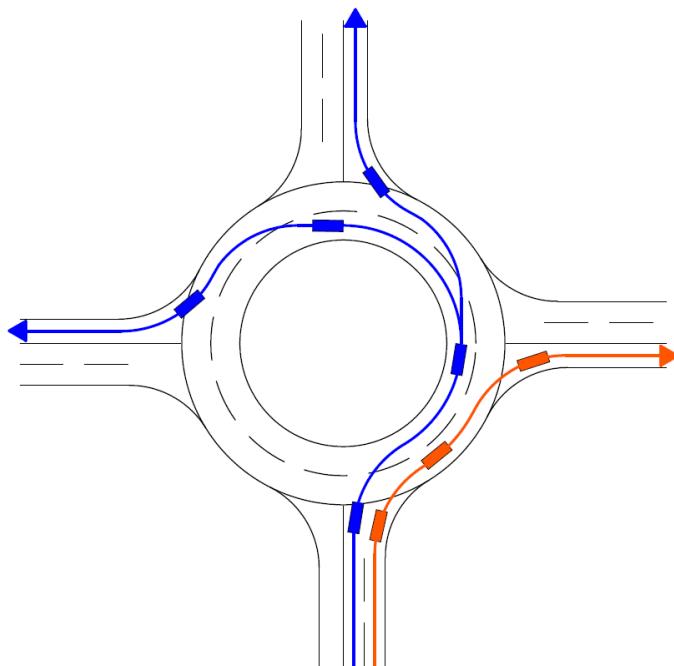


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Fahrweise 2

### 2.3.3 Anwendung der Fahrweisen in der Europäischen Union

Abbildung 7 zeigt einen Überblick über die Anwendung der beschriebenen Fahrweisen in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union sowie der Schweiz und Großbritannien. Die Recherche ergab, dass lediglich in sechs der betrachteten Länder eine Regelung als Gesetz oder Empfehlung vorliegt. Aufgrund der sprachlichen Vielfalt in den Ländern und der damit verbundenen sprachlichen Barriere kann jedoch nicht sichergestellt werden, dass die Übersicht vollständig ist. Während die Straßenverkehrsgesetze und -ordnungen der Länder oftmals in englischer Sprache zur Verfügung stehen bzw. überhaupt auffindbar und abrufbar sind, ist dies insbesondere bei den Empfehlungen durch die Automobilclubs nur bedingt möglich.

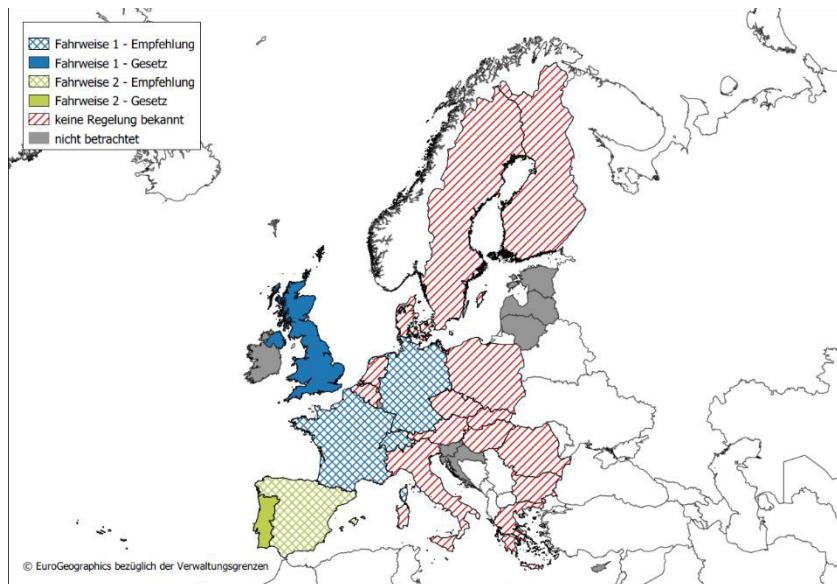


Abbildung 7: Überblick über die Anwendung der Fahrweisen in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union sowie der Schweiz und Großbritannien, Kartengrundlage: [EUROSTAT, 2018]

### **2.3.4 Abgrenzung der Fahrweise 2 zum einstreifigen Kreisverkehr mit Bypässen**

Fahrweise 2 ähnelt stark einer Ergänzung des einstreifigen Kreisverkehrs durch vier Bypässe, jedoch unterscheiden sich die Lösungen in verschiedenen Punkten. Wichtige Kriterien sind dabei einerseits der Flächenverbrauch respektive die versiegelte Fläche, die Führung des Rad- und Fußverkehrs sowie die Unterschiede, wie und in welchen Bereichen sich Fahrzeuge einordnen müssen.

#### **Flächenverbrauch und versiegelte Fläche**

Zum Vergleich des Flächenverbrauchs respektive der versiegelten Fläche ist in Abbildung 8 eine Überlagerung der Fahrbahnänder eines zweistreifigen Kreisverkehrs mit einem Außendurchmesser von 50 m und eines einstreifigen Kreisverkehrs mit einem Außendurchmesser von 40 m (was in etwa dem Außendurchmesser des inneren Fahrstreifens beim zweistreifigen Kreisverkehrs entspricht) dargestellt. Die Bypässe sind nach den Mindestmaßen für Ausfädelungs- und Einfädelungsstreifen nach FGSV [2013] konstruiert. Die rechnerisch notwendige Länge (Rückstaulänge) des Ausfädelungsstreifens hat hierbei keinen Einfluss auf den Vergleich, da die gleiche Rückstaulänge auch für den zweistreifigen Bereich der Zufahrt beim zweistreifigen Kreisverkehr anzusetzen wäre.

Die Anlage von Bypässen ist in der Regel beschränkt auf einzelne Abbiegebeziehungen. Wenn mehr als ein Bypass erforderlich ist, so ist die Zweckmäßigkeit zu prüfen und ggf. eine andere Knotenpunktart zu wählen. [FGSV, 2013] Eine Anlage von vier Bypässen wird aber seitens des Regelwerkes nicht prinzipiell ausgeschlossen.

Wie aus Abbildung 8 ersichtlich wird, ist beim einstreifigen Kreisverkehr mit vier Bypässen mit einem höheren Flächenbedarf zu rechnen. Bereits mit der Anlage von zwei Bypässen übersteigt der Flächenbedarf den des zweistreifigen Kreisverkehrs. Auch bei der versiegelten Fläche ist ein leichter Mehrverbrauch abzuleiten, wenn auch in geringerem Umfang.

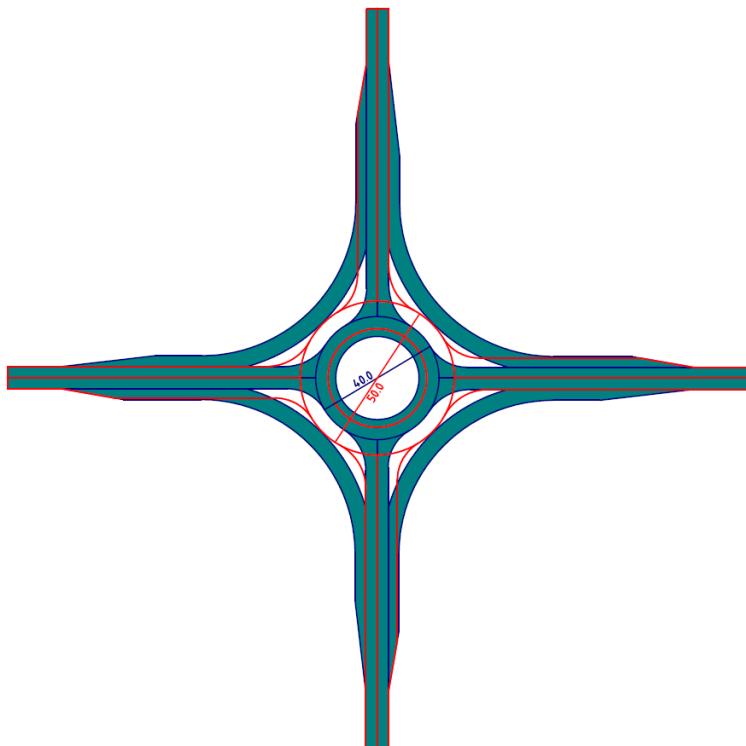


Abbildung 8: Gegenüberstellung Flächenbedarf und versiegelte Fläche von zweistreifigem Kreisverkehr (rote Linie) und einstreifigen Kreisverkehr mit vier Bypässen (blaue Linie, dunkel Cyan hinterlegt)

Insbesondere der erhöhte Flächenbedarf darf hier als ein entscheidendes Kriterium gegen einen einstreifigen Kreisverkehr mit Bypässen bei der Wahl der geeigneten Knotenpunktart innerorts angesehen werden.

## Rad- und Fußverkehr

Ein weiteres entscheidendes Kriterium für einen einstreifigen Kreisverkehr mit Bypässen ergibt sich allerdings aus der Möglichkeit den Fuß- und Radverkehr in für den Kfz-Verkehr gewohnter Weise einzubinden, während dies beim zweistreifigen Kreisverkehr im Bereich zweistreifiger Elemente nicht zu vertreten ist. [FGSV, 2006b] Entsprechende Beispiele der Führung des Rad- und Fußverkehrs an einem Bypass zeigen Abbildung 9 und Abbildung 10.



Abbildung 9: Bypass an einem einstreifigen Kreisverkehr mit Führung des Fuß- und Radverkehrs in Karlsruhe [WOLLF, 2021]

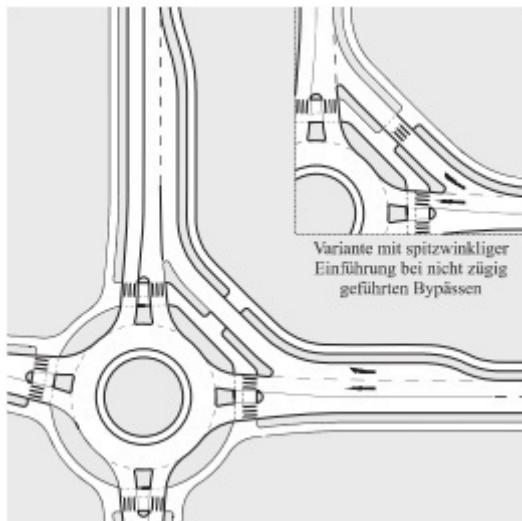


Abbildung 10: Bypass an einem einstreifigen Kreisverkehr mit Führung des Fuß- und Radverkehrs [FGSV, 2006b]

### Verkehrsablauf

Ein weiteres Argument für einen einstreifigen Kreisverkehr mit Bypässen ist insbesondere hinsichtlich der Verkehrssicherheit zu erwarten, da Fahrstreifenwechsel auf der Kreisfahrbahn entfallen und stattdessen Einfädelungsvorgänge erst nach der Ausfahrt aus dem Kreisverkehr stattfinden.

Generell folgt der Verkehrsablauf hierbei anderen Randbedingungen. Beim zweistreifigen Kreisverkehr erfolgen die Fahrstreifenwechsel durch die Fahrzeuge auf dem inneren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn, die auf den äußeren Fahrstreifen wechseln müssen. Nachfolgende Fahrzeuge müssen über den rechten Rückspiegel und einen Schulterblick nach rechts erkannt werden. Die Fahrstreifenwechsel müssen auf einem kurzen, gekrümmten Streckenabschnitt vollzogen werden. Beim einstreifigen Kreisverkehr mit Bypässen müssen sich hingegen die Rechtsabbieger am Ende des Bypasses in den ausfahrenden Verkehrsstrom einordnen. Idealerweise geschieht dies auf einem geraden Streckenabschnitt. Großer Vorteil hierbei ist, dass die Rechtsabbieger bereits bei

Annäherung an den Einfädelungsstreifen, ohne Blick in einen Außenspiegel, Fahrzeuge des bevorrechtigten Stroms erkennen können. Dies ist vergleichbar mit der Ausbildung der Verbindungsrampe im Zuge von planfreien Knotenpunkten. Zudem können Fahrzeuge auf dem Einfädelungsstreifen im Zweifelsfall zum Stehen kommen, ohne eine Blockade des Kreisverkehrs zu verursachen.

# 3 Theoretische Betrachtung der Fahrweisen

## 3.1 Allgemeines

Um die Abläufe bei den jeweiligen Fahrweisen und die daraus resultierenden Unterschiede besser zu verstehen, werden in einem ersten Schritt Strombetrachtungen durchgeführt. Teile hiervon finden sich bereits bei WACHSMANN [2016], an dieser Stelle soll die Betrachtung jedoch systematischer durchgeführt werden. Alle Betrachtungen in diesem Kapitel beziehen sich auf einen nach deutschen Richtlinien konstruierten Kreisverkehr.

## 3.2 Konfliktpunkte

Nach SCHNABEL et al. [2011] sind verschiedene Arten von Konfliktpunkten definiert. An Konfliktpunkten treffen oder schneiden sich die Fahrlinien von Fahrzeugen verschiedener Ströme, in der Regel also bei den Bewegungsformen Einbiegen, Abbiegen und Kreuzen. Konfliktpunkte sind demnach Störstellen, die einen freien Verkehrsfluss einschränken, weil hier Vorfahrtsregeln beachtet werden müssen und/oder Abstimmungen zwischen den Verkehrsteilnehmenden notwendig sind. Dies wirkt sich vor allem in zweierlei Hinsicht auf den Verkehrsablauf aus. Zum einen reduziert sich die Kapazität einzelner Ströme durch das Beachten der Verkehrsregeln und das richtige Interpretieren von Abstimmungen. Zum anderen bergen Konfliktpunkte potenziell die Gefahr der Kollision von Fahrzeugen, wenn die Verkehrsregelungen nicht eingehalten werden oder unklar sind. Eine geringe Anzahl von Konfliktpunkten einer Knotenpunktform kann also neben der theoretisch höheren Leistungsfähigkeit potenziell auch auf eine höhere Verkehrssicherheit der Knotenpunktform hindeuten. „*Gegenüber einer vierarmigen Kreuzung reduziert sich die Anzahl der Konfliktpunkte an einem einstreifigen, vierarmigen Kreisverkehr deutlich .... Beim kleinen zweistreifig befahrbaren Kreisverkehr erhöht sich die Anzahl der Konfliktpunkte jedoch wieder, mit der*

*[Verdoppelung der] Anzahl der Fahrstreifen verdoppelt sich die Anzahl der Konfliktpunkte bei Ein- und Ausfädelungsvorgängen. Hinzu kommen Kreuzungs- bzw. Konfliktpunkte, da Fahrzeuge, die auf den inneren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn einfahren oder aus diesem ausfahren wollen, den Verkehrsstrom auf dem äußeren Fahrstreifen kreuzen müssen.“ [WACHSMANN & RIEL, 2021]*

Die im linken Teil der Abbildung 11 dargestellten Konfliktpunkte gibt es generell bei allen Fahrweisen, in denen alle Fahrbeziehungen möglich sind, also auch bei der Fahrweise 1. Bei strikter Einhaltung der Fahrweise 2 (und dem Fehlen von Lkw, Gespannen und Fahrrädern) reduziert sich hingegen die Anzahl der Konfliktpunkte auf vier.

Mit der strikten Einhaltung der Fahrweise 2 geht jedoch auch einher, dass sich die Verkehrsstärken an verschiedenen Querschnitten im Kreisverkehr verändern. Dies muss auch Auswirkungen auf die Kapazität einzelner Verkehrsströme und des Knotenpunktes als Ganzes haben.

Neben der Erhöhung der Anzahl der Konfliktpunkte durch die Erhöhung der Fahrstreifenanzahl ergibt sich aus der Mehrstreifigkeit auch die Möglichkeit bzw. die Notwendigkeit von Fahrstreifenwechseln. In der Theorie finden diese in den in Abbildung 11 grün dargestellten Bereichen statt. Deren Einfluss auf die Kapazität ist derzeit nicht erforscht, höhere Unfallraten (vgl. [BRILON & GEPPERT, 2015c]) lassen aber den Schluss zu, dass sich eine erhöhte Anzahl an Fahrstreifenwechseln auch negativ auf die Kapazität auswirkt.

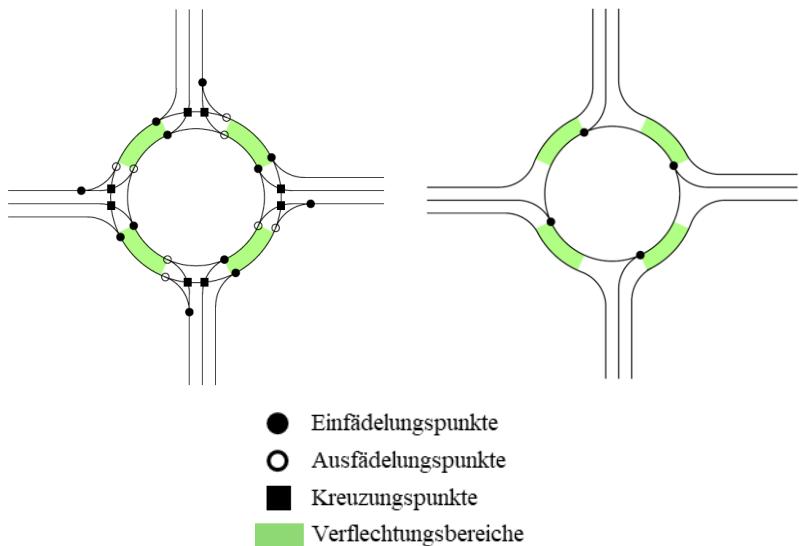


Abbildung 11: Konfliktpunkte an einem zweistreifigen Kreisverkehr bei Anwendung der Fahrweise 1 (links) bzw. der Fahrweise 2 (rechts), Darstellung in Anlehnung an [SCHNABEL et al., 2011]

In Turbokreisverkehren hingegen orientiert sich die Führung der Fahrstreifen an den dominanten Verkehrsströmen, welche möglichst ohne Fahrstreifenwechsel zur vorgesehenen Ausfahrt geführt werden. Dies wirkt sich auch auf die Anzahl der Konfliktpunkte aus. Abbildung 12 zeigt die Konfliktpunkte an einem Turbokreisverkehr mit einer dominanten Hauptrichtung von links/rechts. Bereiche mit Fahrstreifenwechseln werden per o. g. Definition der Eigenschaften ausgeschlossen.

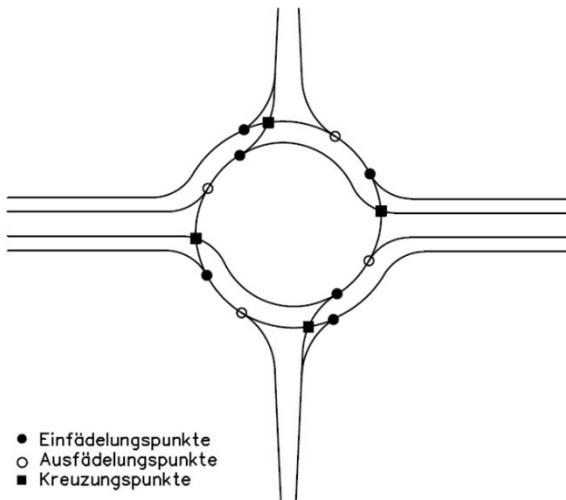


Abbildung 12: Konfliktpunkte beim Turbokreisverkehr, Darstellung in Anlehnung an [SCHNABEL et al., 2011]

### 3.3 Strombetrachtungen

#### 3.3.1 Bezeichnung von Strömen und Fahrstreifen

Die Bezeichnungen von Strömen und Fahrstreifen in Kreisverkehr orientieren sich in den folgenden Betrachtungen an den Festlegungen des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [FGSV, 2015b], vgl. Abbildung 13. Als Hauptrichtung (HR) wird dabei die Achse mit den Zufahrten Z1 und Z3 festgesetzt, die Nebenrichtung (NR) beinhaltet demnach die Zufahrten Z2 und Z4.

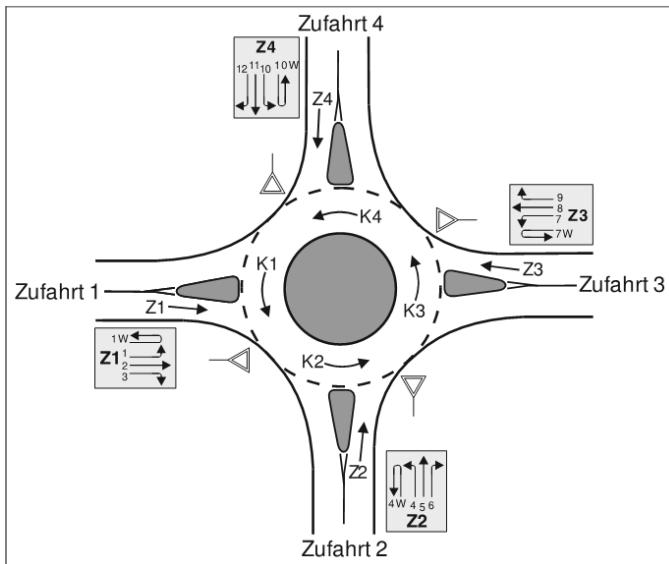


Abbildung 13: Strombezeichnungen gemäß HBS [FGSV, 2015b]

Die zweistufigen Querschnitte K1 bis K4 und Z1 bis Z4 werden für die folgenden Betrachtungen über die Bezeichnungen des HBS hinausgehend differenzierter bezeichnet. So werden die Querschnitte nach Fahrstreifen differenziert und als K1R (rechts/außen) und K1L (links/innen) bzw. in den Zufahrten analog Z1R und Z1L bezeichnet.

Zusätzlich werden auf dem Abschnitt der Kreisfahrbahn zwischen den Zufahrten weitere Querschnitte eingeführt (Abbildung 14). Die blauen Querschnitte (z. B. K1.1L oder K1.2R) repräsentieren die Stellen, an denen die Zufahrt erfolgt ist (K1.1x) bzw. die Ausfahrt gerade noch nicht erfolgt ist (K1.2x). Zwischen diesen beiden Querschnitten finden – vereinfacht angenommen – die Fahrstreifenwechsel von dem inneren auf den äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn statt um den Kreisverkehr an der folgenden Ausfahrt zu verlassen. Die Menge der Fahrzeuge, die diesen Wechsel vornehmen, wird mit qVerfl bezeichnet. Potenzielle Wechsel von außen nach innen werden vereinfacht als nicht vorhanden angenommen.

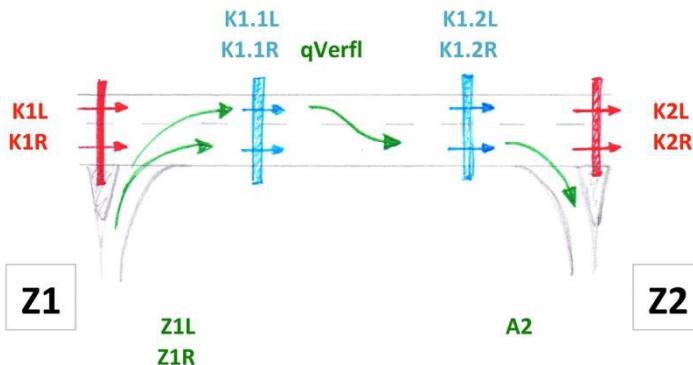


Abbildung 14: Abwicklung eines Abschnitts der Kreisfahrbahn zwischen zwei Zufahrten [WACHSMANN, 2016]

### 3.3.2 Einfluss der Fahrweise auf die Verteilung der Gesamtverkehrsstärke auf die jeweiligen Querschnitte

In einem ersten Schritt soll dargestellt werden, wie sich (bei derselben Gesamtverkehrsmenge) die Verkehrsmengen an den in Abbildung 14 definierten Querschnitten aufgrund der beiden unterschiedlichen Fahrweisen unterscheiden. Es wird an dieser Stelle zugrunde gelegt, dass die Vorgaben strikt eingehalten werden und keine Lkw, Gespanne oder Fahrräder beteiligt sind.

Im Rahmen der Verteilung der Verkehrsströme auf die Haupt- und Nebenrichtung wird die Gesamtverkehrsstärke auf die jeweiligen Zufahrten aufgeteilt. Bei einer Verteilung von zum Beispiel 60/40 (HR/NR) fahren demnach aus den Zufahrten Z1 und Z3 jeweils 30 % und aus den Zufahrten Z2 und Z4 jeweils 20 % des Verkehrs ein, vgl. Abbildung 15.

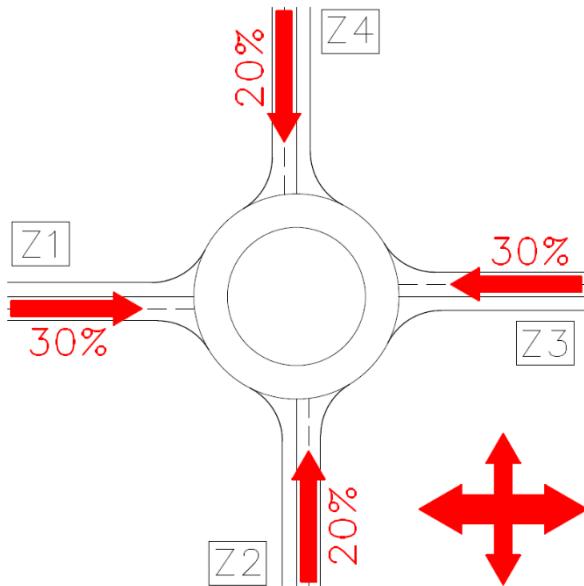


Abbildung 15: Verteilung der Verkehrsströme auf Haupt- und Nebenrichtung im Verhältnis 60/40

Diese einfahrenden Fahrzeuge teilen sich wiederum gemäß der gewählten Verteilung auf die folgenden Ausfahrten auf. Der Zufluss aus Z1 verteilt sich zu 60 % auf die gegenüberliegende Ausfahrt (Z3) und zu jeweils 20 % auf die Ausfahrten der Arme Z2 und Z4. Ein Zufluss aus der Nebenrichtung (Z2 oder Z4) verteilt sich zu 40 % auf die gegenüberliegende Ausfahrt sowie zu je 30 % auf die Ausfahrten der Hauptrichtung, vgl. Abbildung 16.

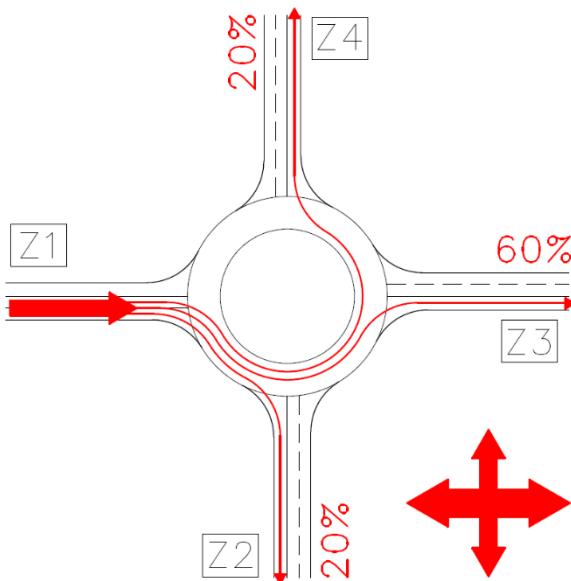


Abbildung 16: Verteilung des Zuflusses aus Z1 auf die Ausfahrten A2, A3 und A4

Tabelle 1 zeigt beispielhaft die Verkehrsstärken an den in Abbildung 14 definierten Querschnitten auf, in Spalte 6 für Fahrweise 1, in Spalte 7 für Fahrweise 2. Die letzte Spalte zeigt prozentual die Zu-/Abnahme bei Einsatz der Fahrweise 2 im Vergleich zu Fahrweise 1, bedingt durch die zugrunde liegenden Vorgaben zur Fahrstreifennutzung (vgl. Kapitel 2.3). Diese prozentuale Zu- / Abnahme ist unabhängig von der Gesamtverkehrsstärke.

Tabelle 1: Verteilung der Verkehrsströme auf die Haupt-/Nebenrichtung von 60/40 bei einer Gesamtverkehrsstärke von 2000 Fz/h

qges [Fz/h]	Vertei- lung HR/NR	von	nach	Quer- schnitt	FW1 [Fz/h]	FW2 [Fz/h]	Abwei- chung [%]
2000	60/40	Z1 (HR)	Z2 (NR)	K1L	240	400	+67%
				K1R	160	0	-100%
				Z1L	120	480	+300%
				Z1R	480	120	-75%
				K1.1L	360	880	+144%
				K1.1R	640	120	-81%
				qVerfl	120	280	+133%
				K1.2L	240	600	+150%
				K1.2R	760	400	-47%
				A2	400	400	0%
				K2L	240	600	+150%
				K2R	360	0	-100%

Wird die Verteilung der Verkehrsströme von 50/50 bis 80/20 variiert, ergeben sich die in Abbildung 17 und Abbildung 18 dargestellten prozentualen Zu- bzw. Abnahmen der Verkehrsstärke am jeweiligen Querschnitt.

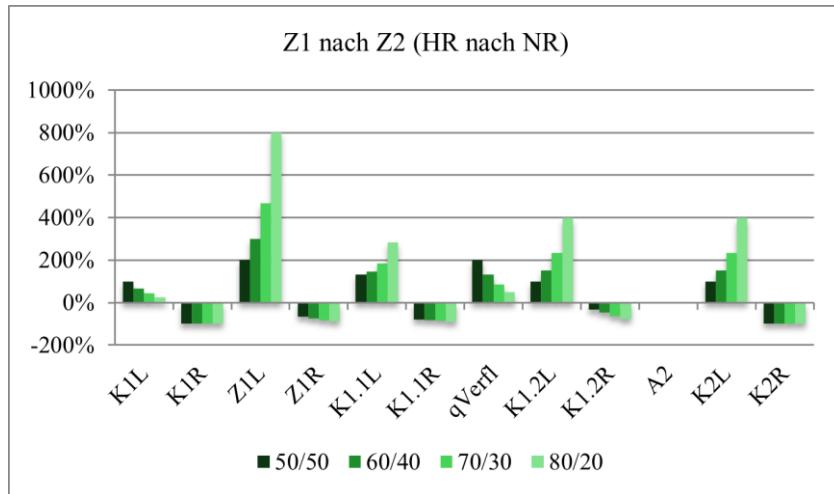


Abbildung 17: Prozentuale Zu- bzw. Abnahme der Verkehrsstärken an verschiedenen Querschnitten, Abschnitt zwischen Z1 nach Z2 (Hauptrichtung nach Nebenrichtung)

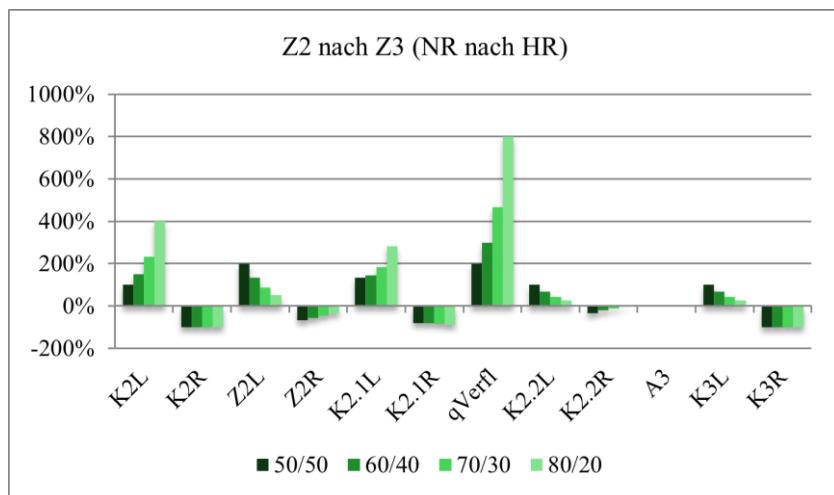


Abbildung 18: Prozentuale Zu- bzw. Abnahme der Verkehrsstärken an verschiedenen Querschnitten, Abschnitt zwischen Z2 nach Z3 (Nebenrichtung nach Hauptrichtung)

Bereits an dieser Stelle lassen sich deutliche Auswirkungen der unterschiedlichen Fahrweisen erkennen:

- Die Zahl der Einbieger auf den äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn (Z1R/Z2R) ist bei Anwendung der Fahrweise 2 deutlich geringer.
- Die Einbieger auf den äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn haben bei Anwendung der Fahrweise 2 freie Zufahrt (zumindest, wenn von den Sonderregelungen bzgl. Gespannen etc. abgesehen wird).
- Die Zahl der Einbieger auf den inneren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn (Z1L/Z2L) erhöht sich dagegen bei Anwendung der Fahrweise 2 deutlich.
- Die Einbieger auf den inneren Fahrstreifen haben lediglich einen Fahrzeugstrom (auf dem inneren Fahrstreifen) zu beachten, da auf dem äußeren Fahrstreifen ein Abbiegegebot an der jeweiligen Ausfahrt besteht (vgl. auch Kapitel 4).
- Für die Fahrstreifenwechsel von innen nach außen ist festzustellen, dass bei Fahrweise 2 eine deutlich höhere Zahl an Fahrzeugen vom inneren auf den äußeren Fahrstreifen wechseln muss. Die Anzahl ist dabei stark abhängig von der Verteilung der Verkehrsströme auf die Haupt- und Nebenrichtung.

Daraus ergeben sich mehrere Fragen, die in Tabelle 2 aufgelistet sind. Im Vordergrund steht dabei vor allem die Frage, ob und in welchem Maße die mutmaßlich höheren Kapazitäten aufgrund der Entlastungen und reduzierten Konfliktpunkte an den einen Stellen durch deutlich höhere Verkehrsstärken an anderen Stellen (über)kompensiert werden.

## 3.4 Folgerungen und offene Fragen

Die hier durchgeführte theoretische Betrachtung berücksichtigt keinerlei andere Einflüsse als die Gesamtverkehrsstärke und deren Verteilung auf die

Zufahrten. Für die Praxis ergeben sich hieraus die in Tabelle 2 aufgelisteten Fragestellungen.

Tabelle 2: Tabellarische Zusammenstellung der Folgerungen aus der theoretischen Betrachtung sowie der daraus resultierenden Fragestellungen bzgl. der Auswirkungen auf die Kapazität, nach [WACHSMANN 2016]

<b>Erkenntnisse aus den Strombe-trachtungen → Folgerungen</b>	<b>Fragestellung zu den Auswirkun-gen der Befolgung von Fahr-weise 2 gegenüber Fahrweise 1 auf die Leistungsfähigkeit</b>
<b>Einfädelungsvorgänge</b>	
<p>Wenig Fahrzeuge auf äußerem Fahrstreifen der Kreisfahrbahn auf Höhe der Zufahrt</p> <p>→ Einbieger auf den inneren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn haben häufiger lediglich den Fahrzeugstrom auf einem Fahrstreifen zu beachten</p> <p>→ freie Zufahrt für Einbieger auf den äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn bei zweistufigen Zufahrten</p>	<p>Höhere Kapazität der Zufahrt, da nur eine anstatt zwei Raum-/Zeitlücken zu beachten ist?</p> <p>Höhere Kapazität, da keine Einfädelungsvorgänge vonstattengehen? Ggf. Verflechtungsvorgänge kapazitätsmindernd?</p>
<p>Höhere Verkehrsmenge auf innerem Fahrstreifen der Kreisfahrbahn auf Höhe der Zufahrt</p> <p>→ größere Anzahl an Fahrzeugen im zirkulierenden Strom, weniger Raumlücken</p> <p>→ geringere Geschwindigkeit?</p>	<p>Kapazitätsminderung, insbesondere bei einstreifigen Zufahrten? Wird der linke Fahrstreifen bei zweistufigen Zufahrten kapazitätsbestimmend?</p>
<p>Zahl der Einbieger auf den äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn reduziert sich</p>	<p>Wird der linke Fahrstreifen der Zufahrt kapazitätsbestimmend?</p>

Zahl der Einbieger auf den inneren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn erhöht sich → Konfliktpunkt stärker belastet, punktuell mehr Einfädelungsvorgänge	Wird der linke Fahrstreifen der Zufahrt kapazitätsbestimmend?
<b>Fahrstreifenwechsel von innen nach außen</b>	
Zum Verlassen der Kreisfahrbahn muss eine größere Zahl an Fahrzeugen vom inneren auf den äußeren Fahrstreifen wechseln → die Zahl der Fahrzeuge, die einen Fahrstreifenwechsel vom inneren auf den äußeren Fahrstreifen vollziehen müssen, ist stets höher als die Zahl der Fahrzeuge auf dem (durchgehenden) äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn	Werden durch die große Anzahl an Fahrstreifenwechseln die ggf. positiven Effekte (s. o.) aufgehoben oder führt dies gar zu einer Verschlechterung? Ergibt sich ggf. eine Behinderung der „Direktabbieger“ und daraus wiederum eine Kapazitätsminderung? Ergeben sich daraus auch weitere Behinderungen des Stroms auf dem inneren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn?
Ausfädelungsvorgänge	
keine Betrachtung	-

## 4 Methoden zur Ermittlung der Kapazität

### 4.1 Begriffsbestimmung

*“Die Kapazität ist die größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebener entwurfstechnischer Gestaltung und Verkehrssteuerung, trockener Fahrbahn und Helligkeit in einem Zeitintervall an einem Querschnitt erreichen kann.”* [FGSV, 2015b] Der sogenannte ‚Verkehrsstrom‘ umfasst dabei alle Verkehrselemente (Fahrzeuge, Fußgänger), die sich in die gleiche Richtung bewegen. [FGSV, 2015b, 2020a] Diese Definition gilt sowohl für Strecken als auch für Knotenpunkte, die jeweiligen Charakteristika der Elemente unterscheidet sich jedoch grundlegend und damit auch die Berechnung der jeweiligen Kennwerte des Verkehrsablaufs. Im Weiteren wird lediglich die Berechnung der Kapazität an vorfahrtsgeregelten Knotenpunkten im Allgemeinen und insbesondere der an Kreisverkehren beschrieben.

Die Kapazität darf dabei nicht als konstante Größe angesehen werden. Beispielsweise haben Geometrie, Verhalten der Verkehrsteilnehmenden sowie Witterung einen Einfluss, sodass die gängigen Berechnungsverfahren lediglich „... einen im Mittel zu erwartenden Zustand [darstellen können]“ [FGSV, 2015b]. Dennoch ist dieser berechenbare, im Mittel zu erwartende Zustand ein unabdingliches Werkzeug um Elemente des Verkehrsnetzes nachfragegerecht so auszubilden, dass diese eine ausreichende Qualität des Verkehrsablaufs ermöglichen, gleichzeitig jedoch nicht überdimensioniert sind.

Bei vorfahrtsgeregelten Knotenpunkten ist die Kapazität der untergeordneten Verkehrsströme (die Verkehrsströme, die anderen Verkehrsströmen Vorfahrt gewähren müssen) abhängig von den Verkehrsstärken der übergeordneten Verkehrsströme. Letztere bestimmen das Angebot von Lücken zwischen den Fahrzeugen der übergeordneten Ströme, in die sich Fahrzeuge aus den untergeordneten Verkehrsströmen einordnen können.

Für den einfachen Fall einer Zufahrt eines einstreifigen Kreisverkehrs (oder einer Einmündung in eine Einbahnstraße) gilt demnach [STUWE, 1992]:

$$C_Z = q_{Z \max} = \text{Funktion } \{q_K\} \quad (4-1)$$

mit:

$C_Z$  = Kapazität der Kreiszufahrt

$q_Z$  = Maximale Verkehrsstärke der Kreiszufahrt

$q_K$  = Verkehrsstärke der Kreisfahrbahn

Zur Ermittlung dieser Funktion wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl von Berechnungsmethoden entwickelt und fortentwickelt, die sich in drei verschiedenen Verfahren zusammenfassen lassen [BRILON & GEPPERT, 2015c], nachfolgend kurz beschrieben sind und bei Relevanz in den folgenden Kapiteln näher betrachtet werden.

- Theorie der Grenzzeitlücken

Das Verfahren ist ein Vertreter der analytischen Modelle und findet vor allem bei wenig komplexen Situationen Anwendung. Ziel ist eine analytische Formulierung des Fahrverhaltens. Üblicherweise kommt das Verfahren bei vorfahrtgeregelten Knotenpunkten zum Einsatz, da es den Vorteil bietet, Kennwerte des Fahrverhaltens empirisch direkt zu ermitteln und die Berechnungsmodelle so mit wenig Aufwand an örtliche Verhältnisse anzupassen. Bei komplexeren Situationen können ggf. nicht alle Parameter erfasst werden, sodass die Modelle hier an ihre Grenzen stoßen. [National Research Council, 2016]

- Regressionsrechnung

Das Verfahren der Regressionsrechnung basiert auf der Erhebung einer Vielzahl an empirischen Daten mit dem Ziel, daraus statistisch abgesicherte Zusammenhänge zwischen geometrischen Merkmalen und Maßzahlen der Kapazität abzuleiten. Das Verfahren wird oft in Fällen benutzt, in denen Berechnungsmodelle auf Basis der Theorie der Grenzzeitlücken zu komplex werden oder wenn das Fahrverhalten nicht in Gänze verstanden wird oder werden kann. Es sind

verschiedene Regressionsfunktionen denkbar. [National Research Council, 2016]

- Stochastische Kapazitätsanalyse

Ausgehend von der Auffassung, dass es sich bei der Kapazität um eine Zufallsgröße handelt (es wurde beobachtet, dass der Verkehrsfluss auch deutlich früher als bei Erreichen der erwarteten Kapazität zusammenbrechen kann), kam in den 1990er-Jahren die Methodik der stochastischen Kapazitätsanalyse auf. Dieser Ansatz findet sich jedoch in keiner bekannten Richtlinie wieder. Aktuelle Untersuchungen gehen nicht davon aus, dass die Methodik “... praktische Bedeutung erlangen [wird].” [BRILON & GEPPERT, 2015c]

In den derzeit gültigen Richtlinien in In- und Ausland finden sich in der Regel Formeln auf Basis der Theorie der Grenzzeitlücken, der Regressionsrechnung oder Mischungen daraus wieder, vgl. hierzu Kapitel 4.4 ff..

Bei Übertragung der Gleichung (4-1) auf einen gesamten Knotenpunkt mit mehreren Verkehrsströmen ist dessen Kapazität als die Summe aller Fahrzeuge, die den Knotenpunkt in einem definierten Zeitintervall passieren können, anzusehen.

## 4.2 Kapazitätsgrundformeln

Die Herleitung der derzeit gängigen Kapazitätsgrundformeln erfolgt auf Basis der Wahrscheinlichkeitstheorie und wird in der frühen Literatur als ‚Zeitlückenverfahren‘ beschrieben. Heute fungiert diese unter dem Terminus ‚Theorie der Grenzzeitlücken‘, vgl. Kapitel 4.1.

Die ersten diesbezüglichen Untersuchungen in Deutschland wurden von GRABE [1954] formuliert, der unter anderem die in Amerika wenige Jahre zuvor erworbenen Erkenntnisse über die Zeitlückensummenlinie im Verkehr beschrieb und auf den Verkehr in Deutschland übertrug und untersuchte. Kern der Untersuchung war die Erkenntnis, dass die Verteilung der Zeitlücken in einem ‚ungestörten Strom‘ durch eine Poissonverteilung gut beschrieben

werden kann. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Zeitlücken ( $ZL \geq t$ ) ergibt sich danach wie folgt:

$$P(ZL \geq t) = e^{-\frac{t*q}{3600}} \quad (4-2)$$

mit:

- q = Verkehrsstärke in Kfz/h
- t = Zeitlücke in s

Dementsprechend ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Zeitlücken ( $ZL \leq t$ ) zu:

$$P(ZL \leq t) = 1 - e^{-\frac{t*q}{3600}} \quad (4-3)$$

Dies bildete die Grundlage für die Untersuchung der ‚Stromknoten‘, die eine Störung des ungestörten Stroms/übergeordneten Verkehrsstrom verursachen, ausgelöst durch verschiedene Bewegungsvorgänge (Ausfädeln, Einfädeln und Kreuzen). Unter Berücksichtigung einer Mindestgröße der Zeitlücke, die im übergeordneten Strom gegeben sein muss, damit n Fahrzeuge des untergeordneten Stroms einfädeln oder kreuzen können, kann so die Leistungsfähigkeit verschiedener Knotenpunkte berechnet werden. Den Berechnungen liegt die Annahme zugrunde, dass alle Fahrzeuge eine sogenannte gleichgroße ‚Grenzzeitlücke‘ benötigen. Auch wenn mehrere Fahrzeuge in die gleiche Lücke einfahren, wird dabei vorausgesetzt, dass jedes Fahrzeug die Größe dieser Zeitlücke benötigt, Fahrzeuggruppen also ein Vielfaches dieser ‚Grenzzeitlücke‘ benötigen. Die ‚Grenzzeitlücke‘ beschreibt dabei die mindestens notwendige Größe einer Lücke, um die Einfahrt eines Fahrzeugs aus dem Nebenstrom zu ermöglichen. [GRABE, 1954]

HARDERS [1968] baut auf den Erkenntnissen von GRABE auf und entwickelt diese weiter zu einer Kapazitätsgrundformel. Dabei wird als ein Eckpfeiler der Berechnungen die Zeitlückenverteilung des bevorrechtigten Stroms beschrieben. Diese folgt, wie schon durch GRABE [1954] beschrieben, einer Zufallsverteilung nach Poisson. Als zweiter Eckpfeiler der Berechnungen wird ein

Abflussgesetz formuliert, welches die Annahme der Zeitlücken durch Fahrzeuge des wertepflichtigen Stroms beschreibt. HARDERS entwickelte dieses Abflussgesetz aus empirischen Messungen aufgrund der Annahme, dass Fahrzeuggruppen kein ganzzahliges Vielfaches der ‚Grenzzeitlücke‘ benötigen, sondern dass lediglich das Fahrzeug in 1. Warteposition diese benötigt. Alle Folgefahrzeuge benötigen kleinere (im Modell konstante) Lücken, die sogenannten ‚Folgezeitlücken‘. Er ermittelte für verschiedene Gruppen von Fahrzeugen der Größe  $n$  „... die im Mittel kleinsten Lücken ...“ [HARDERS, 1968] Dafür werden für jede dieser Gruppen Summenlinien angenommener und abgelehnter Lücken ermittelt und daraus die ‚Grenzzeitlücke für eine Fahrzeuggruppe‘ bestimmt. Aus den Messungen ergibt sich eine lineare Abhängigkeit zwischen der Anzahl der einfahrenden Fahrzeuge und der Lückengröße und damit die Schlussfolgerung, dass die Folgezeitlücke vereinfacht als konstante Größe angenommen werden kann. Das Abflussgesetz wird von HARDERS wie folgt formuliert:

$$t_n = (t_g - t_f) + n * t_f \quad (4-4)$$

mit:

$t_g$  = Grenzzeitlücke

$t_f$  = Folgezeitlücke

$t_n$  = kleinste Lücke, die für das Einfädeln von  $n$  Fahrzeugen ausreicht

$n$  = Anzahl der Fahrzeuge, die in eine Lücke von der Größe  $t_n$  einfahren

Trotz linearer Abhängigkeit weist die Formulierung diskrete Eigenschaften auf. Grafisch dargestellt entspricht dies einer sogenannten Treppenfunktion, vgl. Abbildung 19.

Die Herleitung der Kapazitätsgrundformel erfolgte bei HARDERS anhand der Aufsummierung der Einzelwahrscheinlichkeiten und der jeweils zugehörigen, daraus errechneten Anzahl an einfahrenden Fahrzeugen. Für eine detaillierte Herleitung der daraus resultierenden Formel (4-5) sei an dieser Stelle auf die Literatur (z. B. [SCHNABEL et al., 2011]) verwiesen.

$$G = \frac{q}{e^{q*t_g/3600} - e^{q*(t_g-t_f)/3600}} \quad (4-5)$$

mit:

$G$  = Kapazitätsgrundwert

SIEGLOCH [1973] setzt für seine Berechnungen eine lineare Funktion für das Abflussgesetz an, die durch einen Flächenausgleich der o. g. Treppenfunktion entsteht. Die von GRABE [1954] und HARDERS [1968] angesetzten Treppenfunktionen sieht SIEGLOCH lediglich als Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse. Aus Abbildung 19 wird ersichtlich, dass die obige Funktion (4-4) um  $t_g/2$  verschoben wird (gepunktete Gerade auf durchgängige Gerade). Den Schnittpunkt mit der x-Achse bezeichnet Siegloch als „Nullzeitlücke“  $t_0$ . Diese definiert er als „... diejenige Zeitlücke, die von allen Fahrzeugen abgelehnt wird ...“. [SIEGLOCH, 1973] Diese hat die Größe:

$$t_0 = t_g - t_f/2 \quad (4-6)$$

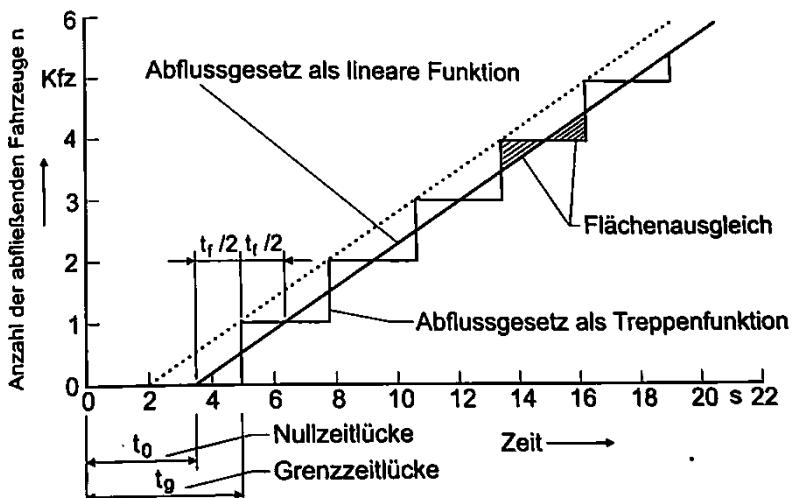


Abbildung 19: Abflussgesetz der wartepflichtigen Fahrzeuge [SCHNABEL et al., 2011]

Mit dieser Definition ergibt sich das Abflussgesetz als lineare Funktion der Form [SIEGLOCH, 1973]:

$$g(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t \leq t_0 \\ \frac{t - t_0}{t_f} & \text{für } t > t_0 \end{cases} \quad (4-7)$$

Für die Definition einer Kapazitätsgrundformel wählt SIEGLOCH [1973] einen anderen Ansatz als HARDERS, der sich auf den folgenden Aussagen stützt:

- „Jede im Hauptstrom auftretende Zeitlücke  $t$  ergibt einen Anteil Leistungsfähigkeit ... .“ [SIEGLOCH, 1973]
- Dieser Anteil „... errechnet sich aus der Häufigkeit  $f(t)$ , mit der eine Lücke der Größe  $t$  auftritt, multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit  $p_n(t)$ , daß diese Lücke von  $n = 1, 2, 3 \dots$  Fahrzeugen angenommen wird, multipliziert mit dem jeweiligen  $n$ “ [SIEGLOCH, 1973].

Die Funktion  $f(t)$  beschreibt die Wahrscheinlichkeitsdichte und ergibt sich aus der 1. Ableitung der bekannten Verteilungsfunktion der Zeitlücken im übergeordneten Strom (vgl. Gleichung (4-3)). Die Wahrscheinlichkeit  $p_n(t)$  entspricht der Funktion des Abflussgesetzes  $g(t)$ , vgl. Gleichung (4-7).

Die gesamte Leistungsfähigkeit ermittelt sich aus der Integration über den gesamten Bereich von  $t$  zu:

$$C = q * \int_0^{\infty} f(t) * g(t) dt \quad (4-8)$$

mit:

- $C$  = Kapazität des Nebenstroms in Kfz/h  
 $q_p$  = Verkehrsmenge im Hauptstrom in Kfz/h

Aus der Lösung der Integrale und dem Einsetzen der Integrationsgrenzen ergibt sich die Kapazitätsgrundformel von SIEGLOCH zu:

$$G = \frac{3600}{t_f} * e^{-q_p * t_0 / 3600} \quad (4-9)$$

mit:

G = Kapazitätsgrundwert in Pkw-E/h

Die Formeln von HARDERS sowie SIEGLOCH liefern annähernd gleiche Kapazitätswerte, aufgrund der einfacheren Form wird jedoch häufig die Formel von SIEGLOCH praktisch angewendet. [SCHNABEL et al., 2011] Die bis dahin angewendeten Formeln konnten als Sonderfälle der von SIEGLOCH entwickelten allgemeinen Kapazitätsgrundformel nachgewiesen werden. Diese gilt jedoch nur „*für elementare Verkehrsvorgänge, bei denen jeweils ein untergeordneter Strom in einen bevorrechtigten Strom einfädelt oder ihn kreuzt ...*“ [SIEGLOCH, 1973].

## 4.3 Weiterentwicklung der Kapazitätsgrundformeln

Gleichung (4-9) entspricht nach WU [1997a] einem Berechnungsverfahren für die Kategorie ‚Wartesystem mit einem Hauptstrom und einem Nebenstrom‘ (vgl. hierzu auch [SHORTLE et al., 2018]). Neben den oben vorgestellten Ansätzen sind weitere Ansätze bekannt, die jedoch jeweils nur unter bestimmten Voraussetzungen gültig sind. Beispielsweise ergeben sich unterschiedliche Formeln, wenn von freiem oder teilgebundenem Verkehr, diskretem oder kontinuierlichem Einfahren, konstanten oder verteilten Zeitlücken sowie konsistentem oder inkonsistentem Fahrverhalten ausgegangen wird. [WU, 1997a]

WU greift all diese Ansätze auf und integriert sie in ein Berechnungsmodell, welches drei verschiedene Zustände im Hauptstrom betrachtet und eine verallgemeinerte Form für die Berechnung der Kapazität ohne Lichtsignalanlage liefert. [WU, 1997b]

Die Kapazität eines Nebenstroms ergibt sich nach WU [1997a] wie folgt:

$$C = C_S * p_{0,S} * p_{0,B} * p_{0,F} \quad (4-10)$$

mit:

$C$  = Kapazität des Nebenstroms

$C_S$  = Sättigungsleistungsfähigkeit im fahrzeugfreien Zustand

$p_{0,S}$  = Wahrscheinlichkeit des staufreien Zustandes

$p_{0,B}$  = Wahrscheinlichkeit des blockfreien Zustandes

$p_{0,F}$  = Wahrscheinlichkeit des fahrzeugfreien Zustandes

Aus den drei „... Wahrscheinlichkeiten kann der Anteil der Zustände im Hauptstrom errechnet werden, in denen keine Behinderung für den Nebenstrom vorhanden ist. Die Leistungsfähigkeit für den Nebenstrom wird dann aus der Multiplikation der Sättigungsleistungsfähigkeit und dem Anteil des Zustandes für ohne Behinderung berechnet“ [WU, 1997a], vgl. Abbildung 20.

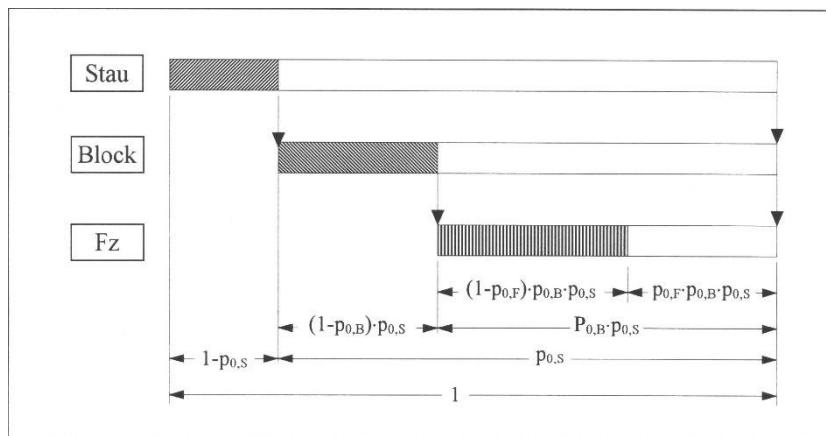


Abbildung 20: Zustände im Hauptstrom und deren Wahrscheinlichkeiten [WU, 1997a]

Die Kapazität für Wartesysteme mit mehreren bevorrechtigten Hauptströmen kann nach dem gleichen Prinzip bestimmt werden. Stellvertretend,

insbesondere auf die Entwicklung der Kapazitätsformel für mehrstreifige Kreisverkehre bezogen, ergibt sich die Kapazität für ein ‚Wartesystem mit mehreren parallel laufenden Hauptströmen‘ aus den Produkten der oben aufgeführten Einzelwahrscheinlichkeiten für die Ströme i [WU, 1997a]:

$$C = C_S * \prod_{i=1}^n p_{0,S,i} * \prod_{i=1}^n p_{0,B,i} * \prod_{i=1}^n p_{0,F,i} \quad (4-11)$$

## 4.4 Kapazitätsformeln für Kreisverkehre

Für Kreisverkehre hat WU [1997b] aus Formel (4-11) die folgende Formel abgeleitet, die so auch im HBS 2001/2009 [FGSV, 2009] zu finden ist.

$$C = 3600 * \left(1 - \frac{t_{min} * q_k}{n_k * 3600}\right) * \frac{n_e}{t_f} * e^{-\frac{q_k}{3600} * (t_g - \frac{t_f}{2} - t_{min})} \quad (4-12)$$

mit:

$C$	= Kapazität des Nebenstroms (Kreiszufahrt)	[Fz/h]
$q_k$	= Verkehrsstärke im Hauptstrom (Kreisfahrbahn)	[Fz/h]
$t_g$	= Grenzzeitlücke	[s]
$t_f$	= Folgezeitlücke	[s]
$t_{min}$	= Mindestzeitlücke	[s]
$n_e$	= Anzahl der Fahrstreifen in der Zufahrt	[ - ]
$n_k$	= Anzahl der Fahrstreifen im Kreis	[ - ]

Hierbei wird „... vereinfacht angenommen, dass a) die Verkehrsstärke im Kreis gleichmäßig auf allen Fahrstreifen verteilt ist, b) die Folgezeitlücke für alle Fahrstreifen in einer Zufahrt gleich ist und c) die Fahrzeuge in der Zufahrt gegenüber allen Fahrzeugen im Kreis (auf allen Fahrstreifen) Vorfahrt zu gewähren haben“ [WU, 1997b].

Bezugnehmend auf Gleichung (4-11) findet sich die Sättigungsleistung  $C_S$  über  $C_S = 3600 * \frac{n_e}{t_f}$  wieder. Die Wahrscheinlichkeit des fahrzeugfreien Zustandes

$p_{0,F}$  ist  $e^{\frac{-q_k}{3600} * (t_g - \frac{t_f}{2} - t_{min})}$ , die Wahrscheinlichkeit des blockfreien Zustandes  $p_{0,B}$  entspricht dem Teil  $\left(1 - \frac{t_{min} * q_k}{n_k * 3600}\right)$  und die Wahrscheinlichkeit des staufreien Zustandes  $p_{0,S}$  wird 1 gesetzt (dadurch wird angesetzt, dass alle Fahrzeuge aus dem Kreis frei abfließen können und keinerlei Störung verursachen).

Durch diesen Ansatz wird eine zunehmende Kolonnenbildung bei steigender Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn berücksichtigt und dadurch bedingt eine zunehmende Minderung der Kapazität der Zufahrt. [LINDENMANN et al., 2009]

Für einstreifige Kreisverkehre hat diese Formel nach wie vor ihre Gültigkeit und ist auch noch so im aktuellen HBS zu finden. [FGSV, 2015b] Die Gültigkeit für zweistreifige Kreisverkehre wurde jedoch durch BRILON & BÄUMER [2004] widerlegt. Die Formel liefert zu hohe Kapazitätswerte, die nicht der Realität entsprechen. Grund hierfür ist die Tatsache, dass die ursprünglichen Werte auf ‚große Kreisverkehre‘ geeicht waren, bei denen die Nutzung der Fahrstreifen in den Zufahrten in der Regel gleichmäßiger verteilt ist. Bei ‚kleinen zweistreifigen Kreisverkehren‘ hingegen wurde nachgewiesen, dass der linke Fahrstreifen deutlich weniger genutzt wird als angenommen, zum damaligen Kenntnisstand in der Regel nur durch die Linksabbieger. [BRILON & BÄUMER, 2004] Untersuchungen von BRILON & GEPPERT [2015b] ergänzen, dass „... die Pkw [hier] in der Regel nicht nebeneinander, sondern allenfalls versetzt zueinander [fahren]“. Eine höhere Kapazität lässt sich daraus dennoch ableiten, denn „die größeren Breiten der Kreisfahrbahn erlauben es ... , kürzere Lücken anzunehmen, weil außen schon eingefahren werden kann, wenn innen im Kreis noch ein Pkw vorbeifährt“ [BRILON & GEPPERT, 2015b].

BRILON & BÄUMER [2004] behalten die Formel von WU grundsätzlich bei, setzen aber aufgrund der gefundenen Erkenntnisse  $t_{min} = 0$  und berechnen den Parameter  $n_e$  für zweistreifige Zufahrten auf Basis des Anteils der Linksabbieger:

$$n_e = 0,3 * a_{LA} + 1,06 \quad (4-13)$$

mit:

$a_{LA}$  = Anteil der Linksabbieger an der Gesamtverkehrs-stärke der betrachteten Zufahrt

Die resultierende Formel (4-14) findet sich mit den Werten  $n_e = 1,0$  für einstreifige respektive  $n_e = 1,14$  für zweistreifige Zufahrten (dies entspräche nach Gleichung (4-13) einem Linksabbiegeranteil von 26,7 %) so in FGSV [2006b] und in abgewandelter Form in FGSV [2015b], siehe Gleichung (4-15).

$$C = 3600 * \frac{n_e}{t_f} * e^{\frac{-q_k}{3600} * (t_g - \frac{t_f}{2})} \quad (4-14)$$

mit:

- C = Kapazität des Nebenstroms (Kreiszufahrt)
- $q_k$  = Verkehrsstärke im Hauptstrom (Kreisfahrbahn)
- $t_g$  = Grenzzeitlücke
- $t_f$  = Folgezeitlücke
- $t_{min}$  = Mindestzeitlücke
- $n_e$  = Parameter für die Anzahl der Fahrstreifen in der Zufahrt (1,0 für einstreifige, 1,14 für zweistreifige Zufahrten)

Gleichung (4-14) kann zudem als Regressionsgleichung der Form

$$C = A * e^{\frac{-q_k}{B}} \quad (4-15)$$

mit:

- C = Kapazität des Nebenstroms (Kreiszufahrt)
- $q_k$  = Verkehrsstärke im Hauptstrom (Kreisfahrbahn)
- A = 1440 für einstreifige, 1642 für zweistreifige Zufahrten gemäß [FGSV, 2015b]
- B = 1180 gemäß [FGSV, 2015b]

ausgedrückt werden, vgl. [FGSV, 2015b]. In Anlehnung an das Highway Capacity Manual (HCM) [National Research Council, 2016] lassen sich die Parameter A und B aus Gleichung (4-15) jedoch auch empirisch mithilfe der Theorie der Grenzzeitlücken ermitteln (Zahlenwerte gemäß [FGSV, 2015b]):

$$A = \frac{3600}{t_f} * n_e \quad (4-16)$$

mit:

$t_f$  = Folgezeitlücke im Hauptstrom = 2,5 s

$n_e$  = Parameter für die Anzahl der Fahrstreifen in der Zufahrt (1,0 für einstreifige, 1,14 für zweistreifige Zufahrten)

$$B = \frac{3600}{t_g - (t_f/2)} \quad (4-17)$$

mit:

$t_g$  = Grenzzeitlücke = 4,3 s

$t_f$  = Folgezeitlücke im Hauptstrom = 2,5 s

Ein Vergleich der Gleichungen (4-9), (4-12) und (4-14) mit gleichen Eingangsparametern ( $t_g = 3,92$  s,  $t_f = 2,52$  s und in Gleichung (4-12)  $t_{min} = 2,1$  s, Anzahl der Fahrstreifen in Zufahrt und Kreis = 2) zeigt Abbildung 21. Die Gleichung von SIEGLOCH dient bei LINDENMANN et al. [2009] lediglich als Vergleichskurve, da diese nicht für zweistreifige Kreisverkehre entwickelt wurde.

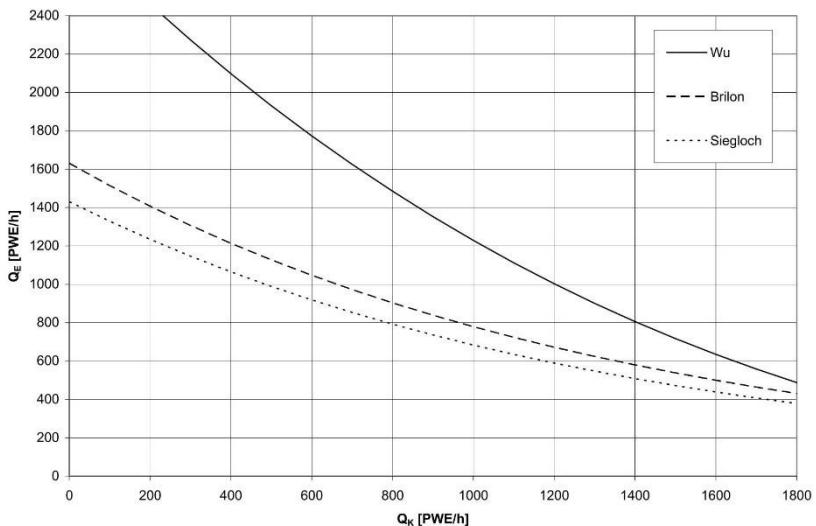


Abbildung 21: Vergleich der Ansätze Zeitlückenverfahren SIEGLOCH, WU und BRILON [LINDENMANN et al., 2009]

Mit Gleichung (4-14) respektive (4-15) steht eine Formel zur Verfügung, die auf zwei verschiedene Arten an örtliche Gegebenheiten angepasst werden kann und leicht handhabbar ist. Eine Berücksichtigung der Aufteilung der Fahrzeuge auf die Fahrstreifen, wie sie für die vorliegende Fragestellung erforderlich ist, ist jedoch nur bedingt für die Zufahrten über den Anteil der Linksabbieger (vgl. Gleichung (4-13)) möglich.

Gleichung (4-15) entspricht zudem dem aktuellen Stand der Technik und findet sich in der aktuellen Fassung des HBS wieder, vgl. [FGSV, 2015b]. Das Verfahren ist gültig für Kreisverkehre mit Durchmessern zwischen 40 und 60 m. Die so ermittelte Grundkapazität ist grafisch in Abbildung 22 veranschaulicht, vgl. hierzu auch Abbildung 21.

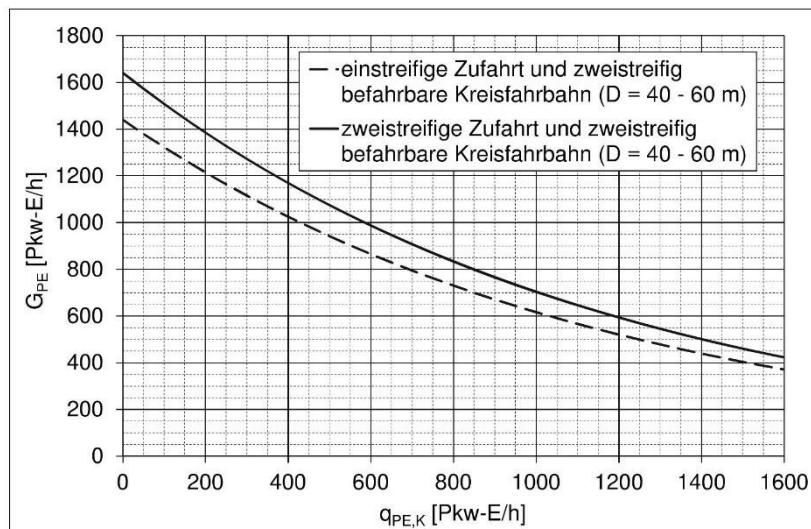


Abbildung 22: Grundkapazität  $G_{PE}$  zweistreifiger Kreisverkehre [FGSV, 2015b]

Generell ist bei der Anwendung des HBS zu beachten, dass die so ermittelten Kapazitätswerte einen „... im Mittel zu erwartenden Zustand [beschreiben]. In der Realität können höhere oder auch niedrigere Kapazitäten ... auftreten“ [FGSV, 2015b]. Des Weiteren sind die Verfahren des HBS deterministisch, analytisch und stationär über die Zeit, „zufallsbedingte Eigenschaften des Verkehrs werden .. nicht dargestellt“ [FGSV, 2015b].

Das HBS basiert in seinen Grundzügen auf dem ‚Highway Capacity Manual‘(HCM), welches in den USA entwickelt wurde. Aus mehreren Jahren Forschung ging 1950 die erste Ausgabe des HCM hervor. Dies beinhaltete Kapazitätsberechnungen für Elemente der ‚Highways‘. Neben der freien Strecke wurden hier auch signalisierte Knotenpunkte berücksichtigt sowie Rampen und Verflechtungsstrecken. [ROESS & PRASSAS, 2014]

Aufgrund der vielen Vorteile von Kreisverkehren und der damit verbundenen Beliebtheit in Europa wurden 1997 Kapazitätsberechnungen für Kreisverkehre erstmals in das HCM aufgenommen. Im Jahr 1995 waren lediglich 12

Kreisverkehre in den USA bekannt, jedoch stieg deren Anzahl stark an, sodass im Jahr 2016 bereits über 5.000 Kreisverkehre verzeichnet werden konnten. [PRASSAS & P. ROESS, 2020]

Das HCM (6th Edition) [National Research Council, 2016] spiegelt den Kenntnisstand aus dem Jahr 2010 wider und umfasst vier Zufahrt-Kreisfahrbahn-Kombinationen (Fahrstreifen Zufahrt/Fahrstreifen Kreisfahrbahn):

- 1/1
- 2/1
- 1/2
- 2/2

Deren Kapazität wird ebenfalls in Form der Gleichung (4-15) berechnet. Die jeweilige Ausbildung des Kreisverkehrs wird dabei über verschiedene Parameter A und B berücksichtigt, die für verschiedene Konstellationen differenzierter berücksichtigt werden. Bei zweistufigen Zufahrten wird die Kapazität für beide Fahrstreifen getrennt berechnet, vgl. Abbildung 23.

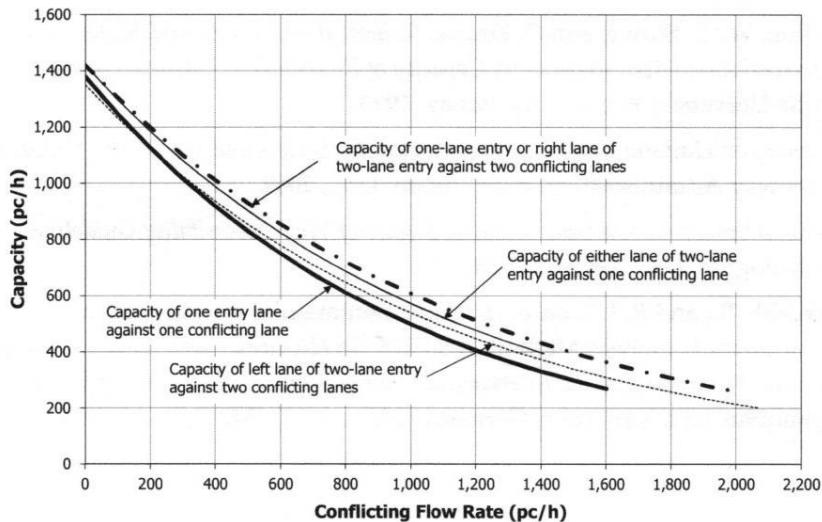


Abbildung 23: Kapazität von Kreisverkehren nach HCM [National Research Council, 2016]

Methodisch werden die jeweiligen Kapazitäten der einzelnen Fahrstreifen aufsummiert, um die Gesamtkapazität der Zufahrt zu erhalten. Wie aus obiger Abbildung ersichtlich wird, ergibt sich damit bei einer zweistreifigen Zufahrt rund die doppelte Kapazität gegenüber einer einstreifigen Zufahrt. Trotz ggf. (leicht) anderen Verkehrsverhaltens erscheint dies, wie oben diskutiert, deutlich zu hoch, bezogen auf die Geometrie deutscher Kreisverkehre.

Eine Berücksichtigung der Aufteilung der Fahrzeuge auf die Fahrstreifen erfolgt demnach auch hier nicht. Die Formel von WU kann nach BRILLON & GEPPERT [2015a] jedoch sinngemäß dahingehend erweitert werden, dass die Aufteilung der Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn Berücksichtigung findet. Die derart modifizierte Formel (4-18) wurde für die Berechnung der Kapazität von Turbokreisverkehren entwickelt, vgl. [FGSV, 2015a].

$$C = \frac{3600}{t_f} * \left(1 - \frac{t_{min} * q_{k,außen}}{3600}\right) * \left(1 - \frac{t_{min} * q_{k,innen}}{3600}\right) * e^{(-\frac{q_{k,außen} + q_{k,innen}}{3600} * (t_g - \frac{t_f}{2} - t_{min}))} \quad (4-18)$$

Dabei wird die Wahrscheinlichkeit des blockfreien Zustandes für beide Fahrstreifen der Kreisfahrbahn getrennt berechnet und beide Wahrscheinlichkeiten multipliziert. Zu beachten ist, dass die Kapazität für jeden Fahrstreifen einer Zufahrt gesondert zu berechnen ist. Die Gesamtkapazität der jeweiligen Zufahrt ergibt sich demnach aus der Summe der Kapazitäten der Fahrstreifen. Die an Turbokreisverkehren anzutreffenden verschiedenen Einfahrtstypen werden auf der Grundlage der Untersuchungen von BRILON & GEPPERT [2010] mit verschiedenen Werten für Grenz-, Folge- und Mindestzeitlücken in FGSV [2015a] berücksichtigt, s. Tabelle 3.

Tabelle 3: Grenz-, Folge- und Mindestzeitlücken für die Kreiszufahrttypen an Turbokreisverkehren [FGSV, 2015a]

Zeile	Kreiszufahrttypen	Grenzzeitlücke $t_g$ [s]	Folgezeitlücke $t_f$ [s]	Mindestzeitlücke $t_{min}$ [s]
	Kreiszufahrttyp Z1			
1	linker und rechter Fahrstreifen der Kreiszufahrt	4,5	2,5	1,9
2	Kreiszufahrttyp Z2 einstufig	4,5	2,5	1,9
3	Kreiszufahrttyp Z3 einstufig	4,3	2,8	2,0
	Kreiszufahrttyp Z4			
4	linker Fahrstreifen der Kreiszufahrt	4,0	2,6	1,9
5	rechter Fahrstreifen der Kreiszufahrt	4,5	2,7	2,0

Mit Formel (4-18) stehen Berechnungsansätze zur Verfügung, die zumindest bei isolierter Betrachtung der Zufahrten auch auf die Konstellation an zweistreifigen Kreisverkehren zutreffen. Insofern kann mittels dieser Methodik eine erste Überprüfung der oben gewonnenen Erkenntnisse zu den Fahrweisen (Kapitel 3) erfolgen.

Im ersten Schritt werden den beiden Fahrweisen verschiedene Kreiszufahrttypen gemäß FGSV [2015a] zugeordnet. Für Fahrweise 1 ist der Kreiszufahrttyp Z4 (Tabelle 3, Zeile 4 und 5), für die Abbildung der Fahrweise 2 der Kreiszufahrttyp Z2 (Tabelle 3, Zeile 2) mit den jeweils entsprechenden Werten für  $t_g$ ,  $t_f$  und  $t_{min}$ .

Grundlage für die nachfolgenden Berechnungen ist die Annahme, dass alle Verkehrsteilnehmenden die jeweilige Fahrweise verinnerlicht haben, diese einhalten und der Anteil des Schwerverkehrs, von Fahrrädern und Gespannen gleich Null ist. Betrachtet wird ein Kreisverkehr mit zweistreifigen Zufahrten. Auf Basis der theoretischen Betrachtung in Kapitel 3.3 werden die Kapazitäten der einzelnen Fahrstreifen der Zufahrten berechnet. Diese ist erreicht, wenn der Auslastungsgrad  $\chi$  eines der beiden Fahrstreifen den Wert 1,0 erreicht, vgl. [FGSV, 2015b]. Konzentrisch angelegte Kreisverkehre gelten nach BRI-LON & GEPPERT [2015c] dann als besonders tauglich, wenn die Aufteilung der Verkehrsnachfrage über alle Ströme gleichmäßig ist. Deshalb werden die Verkehrsstärken in den Zufahrten für die Kapazitätsberechnungen anfangs 50/50 auf Haupt- und Nebenrichtung verteilt. Die Verteilung der Ströme in Geradeausfahrer sowie Links- und Rechtsabbieger wird analog Kapitel 3.3 angesetzt.

Da die Kapazität eines Fahrstreifens der Zufahrt von der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn abhängt, ergibt sich ein iterativer Prozess. Hierbei wird die Gesamtverkehrsstärke gemäß Kapitel 3.3 verteilt und in Schritten von 100 Fz/h sukzessive erhöht, bis die Kapazität erreicht ist. Bei einer Verteilung der Gesamtverkehrsstärke von HR/NR = 50/50 ergeben sich die in Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellten Verläufe. Auf der x-Achse ist hier die Gesamtverkehrsstärke  $q_{ges}$  dargestellt, auf der primären y-Achse die daraus errechnete Kapazität C des betrachteten Fahrstreifens und auf der sekundären y-Achse der Auslastungsgrad x.

Wie aus Abbildung 24 ersichtlich wird, erreicht der rechte Fahrstreifen lediglich bei Fahrweise 1 einen Auslastungsgrad  $x = 1,0$ . Für Fahrweise 2 ergibt sich hier eine konstante Kapazität von 1333 Fz/h unter der Annahme, dass hier freie Zufahrt besteht und lediglich die Folgezeitlücke  $t_f = 2,7$  s beachtet wird ( $3600\text{s}/\text{h} / 2,7\text{s/Fz} = 1333 \text{ Fz/h}$ ). Bei Anwendung der Fahrweise 2 übersteigt die Auslastung für den betrachteten Bereich demnach niemals 20 % der Kapazität, unter Beibehaltung der vorgegebenen Verteilung von HR/NR.

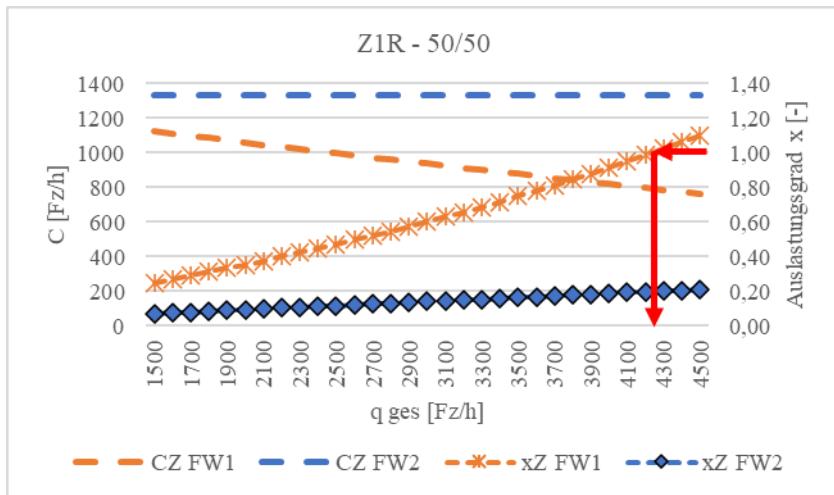


Abbildung 24: Kapazität  $C$  und Auslastungsgrad  $x$  des rechten Fahrstreifens der Zufahrt Z1 bei entsprechender Verteilung der Gesamtverkehrsstärke  $q_{\text{ges}}$  von HR/NR = 50/50 und daraus ermittelten Kapazitäten  $C_Z$  und  $C_{\text{ges}}$  (roter Pfeil)

Bei Betrachtung des linken Fahrstreifens der Zufahrt (Abbildung 25) ergibt sich ein umgekehrtes Bild. Hier erreicht der Fahrstreifen lediglich bei Fahrweise 2 einen Auslastungsgrad  $x = 1,0$ . Bei Fahrweise 1 wird der Fahrstreifen nur zu maximal 47 % ausgelastet. Wie bereits in WACHSMANN [2016] abgeschätzt, wird also bei Anwendung (und Einhaltung) von Fahrweise 2 der linke Fahrstreifen einer Zufahrt bestimmend für die Kapazität.

Für die betrachtete Verteilung der Gesamtverkehrsstärke auf Haupt- und Nebenrichtung von HR/NR = 50/50 ergibt sich eine Gesamtkapazität für den

Knotenpunkt bei Fahrweise 1 von  $C_{ges} = 4.235 \text{ Fz/h}$  (Abbildung 24) und bei Fahrweise 2 von  $C_{ges} = 3.241 \text{ Fz/h}$  (Abbildung 25).

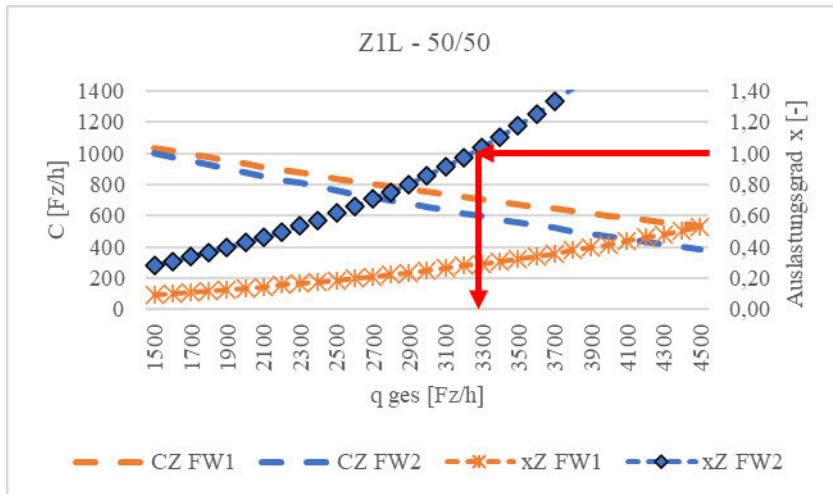


Abbildung 25: Kapazität  $C$  und Auslastungsgrad  $x$  des linken Fahrstreifens der Zufahrt Z1 bei entsprechender Verteilung der Gesamtverkehrsstärke  $q_{ges}$  von HR/NR = 50/50 und daraus ermittelte Kapazitäten  $C_Z$  und  $C_{ges}$  (roter Pfeil)

Demnach bestätigt sich die Annahme, dass Fahrweise 2 zu höheren Kapazitäten führt, vorerst nicht. Diese Aussage relativiert sich jedoch in Teilen dadurch, dass der rechte Fahrstreifen gemäß Fahrweise 2 eine signifikant hohe Kapazitätsreserve aufweist. Es lässt sich demnach die Hypothese aufstellen, dass eine höhere Kapazität erzielbar ist, wenn eine verhältnismäßig höhere Anzahl an Rechtsabbiegern als an Linkssabbiegern und Geradeausfahrern eingespeist wird. Dies gelingt jedoch nicht unter Beibehaltung der vorgegebenen Verteilung von HR/NR.

Abbildung 26 zeigt einen Kapazitätsvergleich bei Anwendung der beiden betrachteten Fahrweisen bei verschiedenen Verteilungen der Gesamtverkehrsbelastung auf HR/NR. Die Kapazitäten der beiden Fahrweisen reduzieren sich bei zunehmender Ungleichverteilung, jedoch übersteigt die Kapazität für Fahrweise 1 die der Fahrweise 2 stets deutlich. Bei Anwendung der Fahrweise 1

wird die Kapazität jeweils in den Zufahrten der Hauptrichtung erreicht, während die Zufahrten der Nebenrichtungen (mit Ausnahme der Gleichverteilung von HR/NR = 50/50) eine Kapazitätsreserve aufweisen (vgl. Abbildung 24 und Abbildung 25). Mit zunehmender Ungleichverteilung steigt diese prozentual betrachtet an. Wird die Kapazität in den Zufahrten der Hauptrichtung erreicht, wird diese in den Zufahrten der Nebenrichtung demnach nicht erreicht. Dennoch ist die Kapazität des Knotenpunkts hiermit erreicht. Das Maximum der Kapazität wird bei HR/NR = 50/50 erreicht.

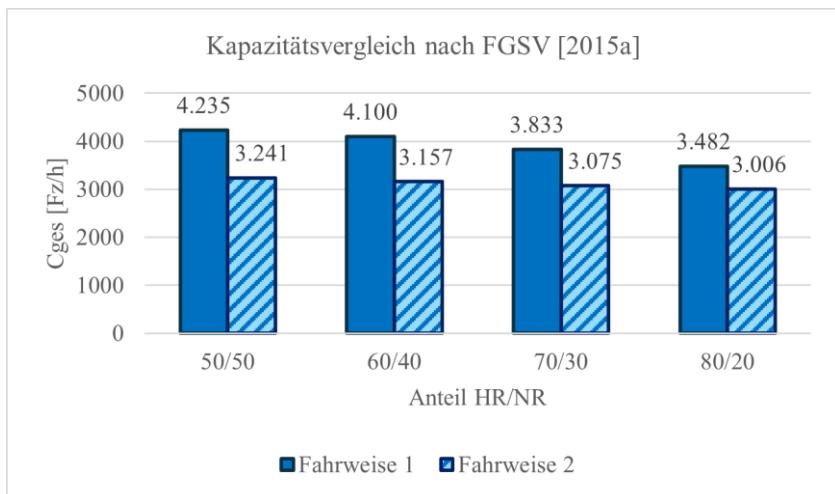


Abbildung 26: Vergleich der ermittelten Kapazitäten nach [FGSV, 2015a]

Diese Erkenntnisse basieren auf den Werten aus [FGSV, 2015a], offen bleibt, ob die Werte für die Grenz-, Folge- und Mindestzeitlücken aus Tabelle 3 für die Anwendung in zweistufigen Kreisverkehren angepasst werden müssten.

## 4.5 Aktuelle Forschungsergebnisse

Alle oben aufgeführten Berechnungsverfahren haben gemeinsam, dass sich diese auf die Kapazitätsberechnung einzelner Zufahrten beschränken. Die

Begrenzung der Kapazitätsrechnung auf einzelne Zufahrten entspricht einer starken Vereinfachung des Verkehrsablaufs und ist dessen Komplexität geschuldet, auf die an anderer Stelle bereits hingewiesen wurde. [BRILON & WU, 2008] Wechselseitige Beeinflussungen verschiedener Teilbereiche im Kreis können auf diese Weise nicht bzw. nur indirekt in die Berechnung mit einfließen, z. B. über die Wahrscheinlichkeit des staufreien Zustandes. WU & BRILON [2018] entwickelten zwischenzeitlich ein Berechnungsverfahren, welches der Bestimmung der Gesamtkapazität von Kreisverkehren dient und sich der sogenannten Konflikttechnik bedient. Hierzu werden die einzelnen Konfliktpunkte an einem Kreisverkehr betrachtet und es werden Wechselwirkungen zwischen den Konfliktpunkten in die Betrachtung mit einbezogen.

Als Konflikt(-punkte) definieren WU & BRILON [2018], wenn verschiedene Verkehrsströme dieselbe Fläche innerhalb eines Knotenpunktes durchfahren müssen. Zudem werden sogenannte Konfliktgruppen definiert, hierunter werden alle Ströme zusammengefasst, die in denselben Konflikt involviert sind. Die Konfliktgruppen umfassen einen oder mehrere Konfliktpunkte (vgl. hierzu auch Kapitel 3.2). Jedes Fahrzeug des bevorrechtigten Stroms besetzt einen Konfliktpunkt für eine bestimmte Zeit, welche demnach nicht mehr für Fahrzeuge des untergeordneten Stroms zu Verfügung steht. Die Berechnung der Kapazität folgt demnach grundlegend der Methodik von WU [1997a].

Die Interaktion zwischen den einzelnen Konfliktpunkten wird durch die Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeiten für Widerstände/Beeinflussung des Verkehrsflusses durch stromabwärts liegende Konfliktpunkte abgebildet. Die Berechnung erfolgt entgegen der Stromrichtung, vgl. Abbildung 27. Dabei entsteht ein komplexes Modell, welches aber mittels eines Tabellenkalkulationsprogramms gut handhabbar ist. [WU & BRILON, 2018]

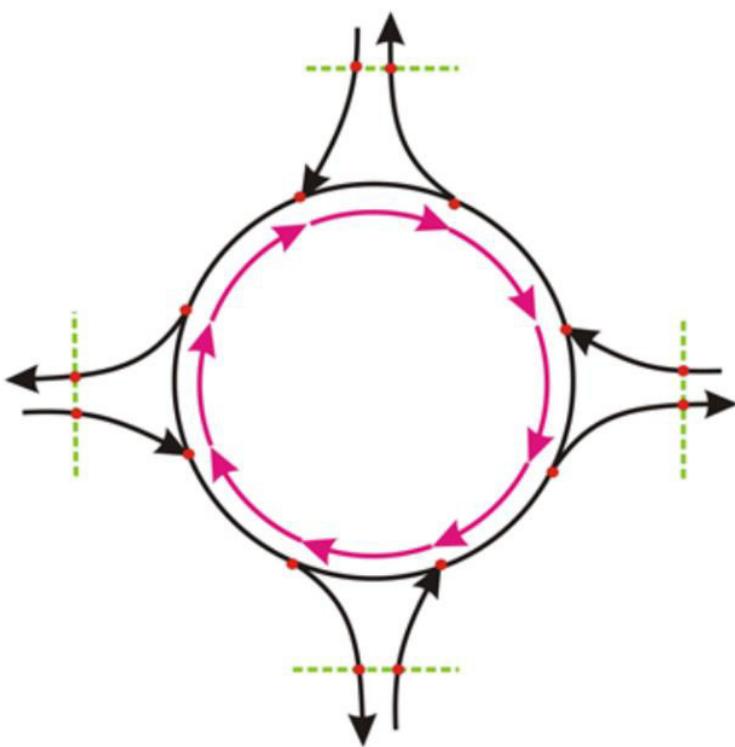


Abbildung 27: Berechnungsrichtung gegen den Strom [BRILON & WU, 2017]

Die von WU & BRILON [2018] genutzten Parameter wurden auf deutsche Kreisverkehre kalibriert und an die Methoden des HBS angepasst. Die entsprechenden Parameter zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4: Konfliktmatrix mit Parametern für eine Kreisverkehrszufahrt und unterschiedlichen Konfigurationen [WU & BRILON, 2018]

Major lane i	Circular inner (I)		Circular outer (O)		Ped (PE)	$C_{0,j}$ (veh/h)			Places between two stages $n_E$ (veh)
	Stage b	Stage a	Veh Stage b	Ped Stage a		Two-stage ab			
Minor lane j									
(a) Mini roundabout entry with single-lane entry and single circular lane (1/1 mini)									
Entry lane	$\tau_i$ (s) $b_{ij}$	2.6 0.9		3.0 0.9		1080	1500	1020	I
(b) Roundabout entry with a single-lane entry and a single circular lane (1/1)									
Entry lane	$\tau_i$ (s) $b_{ij}$	1.8 + 14.5/D <sup>1</sup> 0.9		2.8 0.9		1200	1550	1150	I
(c) Roundabout entry with one entry lane and two circular lanes (1/2)									
Entry left (L)	$\tau_i$ (s) $b_{ij}$	2.3 0.9		2.3 0.9		1270	1330	1080	I
Entry right (R)	$\tau_i$ (s) $b_{ij}$	0.9 0.9		0.9 0.9		1420	1420	1250	I
(d) Roundabout entry with two entry lanes and two circular lanes (2/2)									
Entry left (L)	$\tau_i$ (s) $b_{ij}$	2.4 0.9		2.4 0.9		1010	1010	730	I
Entry right (R)	$\tau_i$ (s) $b_{ij}$	0.9 0.9		0.9 0.9		1100	1100	830	I
(e) Parameters of a roundabout exit with one exit lane									
Exit lane (A)	$\tau_i$ (s) $b_{ij}$	- I		2.9 0.9		1400	1550	1330	I
Upstream outer circular lane as a share lane (O,U)			Exit lane (A) Downstream outer circular (O,D)						$C_{A,T}$ 1640
(f) Parameters for an entry-exit constellation									
Major lane i	Downstream outer lane at the entry with $C_i = C_{0,i}$		Upstream outer lane at the exit with $C_j = C_{0,U}$ from Equation 34		$C_{0,j}$ (veh/h)			Places between two stages $C_i n_{EA}$ (veh)	
Minor lane j	Stage a		Stage b		Stage a	Stage b	Two-stage ab		
	$\tau_i$ (s)	-		-					
Outer circular lane between an entry and an exit (EA)	$b_{ij}$	I		I	1640	1640	1640	1.68*I	

mit:

- $C_{0,j}$  = Grundkapazität [Fz/h]
- $\tau_i$  = Mindestzeitlücke im Hauptstrom [s]
- $b_{ij}$  = Anteil der Fahrzeuge im Hauptstrom, die ihre Vorfahrt wahrnehmen

WU & BRILON [2018] erläutern die Methodik am Beispiel eines einstreifigen, kleinen Kreisverkehrs, für zweistreifige Kreisverkehre werden lediglich die Formeln und Parameter zur Berechnung genannt.

Die Berechnung der Gesamtkapazität erfolgt iterativ. Hierzu wird die Berechnung mit einer geringen Verkehrsstärke von z. B. 1.000 Fz/h gestartet und diese so lange erhöht, bis keine stabile Lösung mehr erreicht wird für die sich ergebenden Auslastungsgrade. [WU & BRILON, 2018] Im Berechnungsbeispiel in Tabelle 5 ergibt sich beispielsweise ein maximaler Auslastungsgrad von  $x = 0,77$  für eine Gesamtverkehrsstärke von 1.918 Fz/h und einer Verteilung dieser von HR/NR von 60/40.

Tabelle 5: Tabellarische Berechnung der Kapazität, Beispiel [WU & BRILON, 2018]

Cross section at arm k	q	$C^*$	On circular lane			At corresponding arm		
			Downstream section		$C$	$x$	q	$C$
			$n + 1$	$f_{imp+1}$				
1	Exit	959	1347	$n_{AE} = 1$	0.96	1296	0.74	575
	Entry	384	1640	$n_{AE} = 3$	0.79	1298	0.30	575
2	Exit	959	1377	$n_{AE} = 1$	0.90	1243	0.77	384
	Entry	575	1640	$n_{AE} = 3$	0.84	1373	0.42	384
3	Exit	959	1347	$n_{AE} = 1$	0.96	1296	0.74	575
	Entry	384	1640	$n_{AE} = 3$	0.79	1298	0.30	575
4	Exit	959	1377	$n_{AE} = 1$	0.90	1243	0.77	384
	Entry	575	1640	$n_{AE} = 3$	0.84	1373	0.42	384
1	Exit	959	1347	$n_{AE} = 1$	0.96	1296	0.74	575
						max x	0.77	0.71

$q$  = traffic volume at the considered cross section on the circular lane (veh/h).

$n + 1$  = storage places on the subsequent downstream section of the circular lane (veh).

=  $n_{AE}$  (storage places between the entry and the downstream exit on the circular lane).

=  $n_{AE}$  (storage places between the exit and the entry on the circular lane).

$C^*$  = capacity of the considered conflict point without impedance of downstream queuing (veh/h).

$C$  =  $C^* f_{imp+1}$ .

= capacity of the considered conflict point with impedance by downstream queuing (veh/h).

$f_{imp+1}$  = impedance factor of downstream queuing on the subsequent section of the circular lane (cf. Equation 47).

(e.g., for the cross section Exit 3 is  $C^* = 1347$ ,  $f_{imp+1} = 1 - 0.3^{(1.48 \times 1 - 1)} = 0.96$ ,  $C = 1347 \times 0.96 = 1296$ ).

Durch die Betrachtung des gesamten Knotenpunktes reduzieren sich die aus den gängigen Richtlinien bekannten Kapazitäten ggf. deutlich.

Ob diese neue Methodik für die Beantwortung der vorliegenden Fragestellung anwendbar ist und die oben getroffenen Erkenntnisse validiert werden können, soll ebenfalls eine Beispielrechnung zeigen. Das Verfahren wurde hierfür auf zweistufige Kreisverkehre adaptiert und im Rahmen einer Tabellenkalkulation implementiert. Die genutzten Eingangswerte sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Gesamtverkehrsstärke des Kreisverkehrs wird analog zum vorigen Kapitel sukzessive erhöht, bis diese nicht weiter gesteigert werden kann oder wenn an einem der betrachteten Konfliktpunkte der Auslastungsgrad  $x = 1,0$  erreicht wird. Um die Auswirkungen der beiden Fahrweisen auf die Fahrstreifen der

Zufahrten im Allgemeinen aufzuzeigen, zeigen A-Abbildung 3 und A-Abbildung 4 (Anhang 1) die Berechnung für eine Verteilung der Gesamtverkehrsstärke  $HR/NR = 60/40$ . Abweichend zum vorigen Kapitel soll durch die Aufteilung in HR und NR dargestellt werden, welche Elemente an welcher Stelle die Kapazität beschränken.

Bei Zugrundelegung von Fahrweise 1 ist die Gesamtkapazität bei 2.690 Fz/h erreicht. Dabei weist die Kreisfahrbahn einen maximalen Auslastungsgrad von  $x = 0,81$  auf. Dieser ergibt sich für den äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn stromaufwärts der Zufahrten der Nebenrichtung. Der maximale Auslastungsgrad der Zufahrten beträgt  $x = 0,71$  und ergibt sich in den Zufahrten der Hauptrichtung auf dem rechten Fahrstreifen. Bei Fahrweise 2 ist die Gesamtkapazität bei 2.710 Fz/h erreicht. Dabei weist die Kreisfahrbahn einen maximalen Auslastungsgrad von  $x = 0,59$  auf, dieser ergibt sich für den inneren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn stromaufwärts der Zufahrten der Nebenrichtung. Der maximale Auslastungsgrad der Zufahrten beträgt  $x = 1,0$  und ergibt sich in den Zufahrten der Hauptrichtung auf dem linken Fahrstreifen. Eine weitere Erhöhung der Verkehrsstärke auf dem rechten Fahrstreifen ist trotz eines geringen Auslastungsgrades von  $x = 0,16$  nicht möglich, wie Berechnungen im Rahmen der anderen Verteilungen HR/NR zeigen (vgl. Anhang 1).

Bei Variation der Verteilung der Gesamtverkehrsstärke ergibt sich der in Abbildung 28 dargestellte Vergleich der Kapazität für die beiden Fahrweisen.

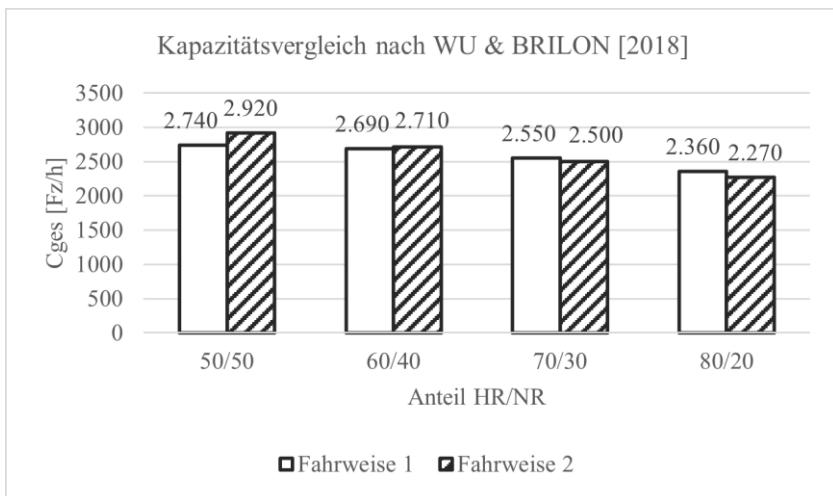


Abbildung 28: Ergebnisse der Berechnung nach [WU & BRILON, 2018]

Verglichen mit den Ergebnissen aus Kapitel 4.4 ist Folgendes festzustellen:

- Die ermittelten Kapazitäten nach WU & BRILON [2018] sind alle deutlich geringer als nach FGSV [2015a]. Dies erscheint plausibel, da bei WU & BRILON [2018] die Wechselwirkungen zwischen den Konfliktpunkten elementarer Teil des Berechnungsverfahrens sind, bei FGSV [2015a] werden diese nicht berücksichtigt.
- Bei einer gleichmäßigen Verteilung von  $HR/NR = 50/50$  übersteigt die Kapazität der Fahrweise 2 die der Fahrweise 1 um 6,5 %. Nach FGSV [2015a] weist die Anwendung von Fahrweise 2 hingegen bis zu 23,5 % niedrigere Kapazitäten auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei FGSV [2015a] methodisch bedingt lediglich die Zufahrten kapazitätsbestimmend werden. Während dies nach WU & BRILON [2018] auch bei Fahrweise 2 der Fall ist, wird bei Fahrweise 1 die Kreisfahrbahn kapazitätslimitierend, sodass die beiden Verfahren in diesem Punkt nicht vergleichbar sind.

## 4.6 Anwendung alternativer Verfahren

Die in den Kapiteln 4.4 und 4.5 durchgeführten Beispielrechnungen kommen zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen. Zudem sind bei beiden Methoden jegliche erforderliche Fahrstreifenwechsel auf der Kreisfahrbahn nicht berücksichtigt. Aufgrund der Systematik wäre dies lediglich bei WU & BRILON [2018] möglich, indem eine Art Störfaktor ermittelt und in das Berechnungsschema integriert werden würde.

Die Komplexität der Fragestellung und die oben beschriebenen Vereinfachungen und Einschränkungen bei den derzeit gängigen Berechnungsverfahren rücken die Anwendung alternativer Verfahren in den Fokus. Für die Beurteilung von zweistreifigen Kreisverkehren unter Berücksichtigung verschiedener Fahrweisen erscheint die Anwendung einer Verkehrssimulation zielführend.

Nach FGSV [2006a] lassen sich Simulationsmodelle „*... nach der Abbildungs- genauigkeit ordnen, mit der die Verkehrsströme dargestellt werden*“. Dies geschieht in sogenannten ‚Modellgruppen‘. Während bei makroskopischen Simulationsmodellen der Verkehrsfluss lediglich anhand aggregierter Kenngrößen (z. B. Verkehrsstärke, Verkehrsdichte) beschrieben wird, werden bei den mikroskopischen Simulationsmodellen sogenannte Fahrer-Fahrzeug-Einheiten (FFE) betrachtet. D. h. es „*... werden sowohl die individuellen Eigenschaften verschiedener Fahrzeuge und Fahrer als auch die Interaktionen der Fahrzeuge untereinander nachgebildet*“ [FGSV, 2006a]. In sogenannten Verhaltensmodellen werden Rechenalgorithmen (in der Regel zum Längs- und Querverhalten der FFE) hinterlegt, die die definierten Regeln, nach denen sich die FFE im Netz bewegen und miteinander interagieren, abbilden. [FGSV, 2006a] Diese, im Vergleich zu den makroskopischen Simulationsmodellen, erhöhte Genauigkeit ist für die vorliegende Fragestellung zwingend notwendig.

Der Einsatz anderer Modellgruppen ist aufgrund fehlender Interaktion zwischen den Fahrzeugen (Mesoskopische Simulationsmodelle), zu hohem DetAILlierungsgrad (Submikroskopische Simulationsmodelle) oder aufgrund einer fehlenden Notwendigkeit der Abbildung makroskopisch modellierter Streckenabschnitte (Hybridmodelle) nicht zielführend. [FGSV, 2006a]

Sollen die Ergebnisse der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation mit Ergebnissen händischer Berechnungsverfahren verglichen werden, ist es von elementarer Bedeutung, dass die entsprechenden Kenngrößen, die zur Beurteilung der Kapazität dienen, vergleichbar sind bzw. deren Unterschiede deutlich herausgearbeitet werden.

# 5 Mikroskopische Verkehrsflusssimulation

## 5.1 Wahl der Simulationssoftware

Zur Durchführung des im Rahmen der Fragestellung durchgeföhrten Simulationsexperiments wird die Simulationssoftware ‚PTV Vissim‘ gewählt.

SADEK et al. [2008] haben „... *in einem Vergleich mit anderen Simulationswerkzeugen [(aaSIDRA, Paramics, SimTraffic)] festgestellt, dass VISSIM für die Mikrosimulation von Kreisverkehren am besten geeignet ist, realistische und allgemeingültige Ergebnisse für unterschiedliche Verkehrsbelastungen zu ermitteln*“ [BRILON & GEPPERT, 2015c]. Neuere Untersuchungen von BRILON & GEPPERT [2015c] bestätigen diese Erkenntnis generell.

Das in der Software implementierte Simulationsmodell ist mikroskopisch, zeitschritt- und verhaltensbasiert aufgebaut. [PTV Group, 2024] Neben dem hier betrachteten Motorisierten Individualverkehr (MIV) lassen sich prinzipiell auch der Öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) sowie der Rad- und Fußverkehr simulieren. Für den MIV stehen hierbei zwei Fahrzeugfolgemodelle zur Verfügung. [PTV Group, 2024]

## 5.2 Kapazität in ‚PTV Vissim‘

### 5.2.1 Unterschiede zwischen HBS und ‚PTV Vissim‘

Die Kapazität wird in ‚PTV Vissim‘ analog zum HBS definiert. Die maximale Anzahl an Fahrzeugen lässt sich aus der Software auslesen und dient potenziell als eine Größe zur Kalibrierung des Modells. Im ‚PTV Vissim‘-Handbuch wird jedoch darauf hingewiesen, dass es „... *zu einer systematischen Abweichung zwischen dem Ergebnis der Simulation und den analytisch nach HBS*

*berechneten Kenngrößen kommen [kann]”* [PTV Group, 2024]. Dies hat folgende Gründe:

- Die ‘mittlere Wartezeit’ wird nach HBS analytisch bestimmt und bedarf einer gewissen Abstraktion des Verkehrs (hier wird lediglich ein Querschnitt über einen Betrachtungszeitraum und der dort ermittelten Verkehrsstärke berechnet) sowie der Knotenpunkte. Hingegen wird in der Simulation jede einzelne FFE betrachtet und für jede der FFE kann exakt die Verlustzeit ermittelt werden. Auch lokale Besonderheiten finden lediglich in der Simulation Berücksichtigung.
- Nach HBS werden „... *die Wartezeitanteile aller Fahrzeuge, die den Knoten passieren [berücksichtigt]. In der Simulation ist die Erfassung auf den Bereich begrenzt, den die dazu modellierten Reisezeitmessungen oder Verlustzeitmessungen abdecken*“ [PTV Group, 2024]. Dieser Bereich ist in der Simulation demnach so zu wählen, dass ausgeschlossen werden kann, dass sich Fahrzeuge über die Grenzen des betrachteten Bereichs hinaus zurückstauen.
- Die Wartezeiten steigen im Überlastungsfall bei Berechnung nach HBS steiler an als bei der Ermittlung mit „PTV Vissim“. [PTV Group, 2024] Grund hierfür ist die Kombination aus oben genannter Abstraktion des Verkehrs im HBS, welche die gesamte Verkehrsstärke numerisch berücksichtigt, und des Auswertebereichs in „PTV Vissim“ welcher nur die Fahrzeuge im untersuchten Bereich berücksichtigt, deren Anzahl ggf. unter der Verkehrsstärke in der Zufahrt nach HBS liegt.

## 5.2.2 Einsatzgrenzen der Software

2015 untersuchten Brilon und Geppert den Verkehrsablauf und die Verkehrssicherheit an zweistufig befahrbaren Kreisverkehren und „Turbokreisverkehren“. [BRILON & GEPPERT, 2015c] Zum Einsatz kam auch die o. g. Simulationssoftware. Sie bestätigten damit die von SADEK et al. [2008] durchgeföhrten Untersuchungen aus dem Jahr 2008. Jedoch konnte auch festgestellt werden, dass die Software derzeit bei der Modellierung des

Verkehrsablaufs an ‚kleinen zweistufigen Kreisverkehren‘ und ‚Turbokreisverkehren‘ noch an ihre Grenzen stößt. Es war nicht gelungen, die empirisch ermittelten Verlaufskurven der Kapazitätswerte nachzubilden. [BRILON & GEPPERT, 2015c]

Wie eingangs beschrieben, besteht die generelle Problematik darin, dass es bei der Betrachtung des ‚kleinen zweistufigen Kreisverkehrs‘ im Gegensatz zum ‚kleinen einstufigen Kreisverkehr‘, eine Vielzahl an Wechselwirkungen und Verkehrsabhängigkeiten gibt, die nach derzeitigem Kenntnisstand nicht in der Mikrosimulation abgebildet werden können. So führen beispielsweise „... längere Überlastungen .. zu höheren Kapazitäten als kurzfristige Überlastungen“ [BRILON & GEPPERT, 2015c].

Dies spiegelt sich in den Beobachtungen von BRILON & GEPPERT [2015c] wieder: die in der Simulation ermittelte Kapazitätskurve weist eine größere Neigung auf, als die empirisch ermittelte. Das heißt „im Bereich niedriger Verkehrsstärken im Kreis gibt die Simulation zu hohe Kapazitätswerte aus. Bei hohen Verkehrsstärken [im Kreis] liegen die simulierten Werte dagegen unter den Messwerten“ [BRILON & GEPPERT, 2015c]. Die Verwendung einheitlicher Parameter führt demnach zu einer guten Übereinstimmung zwischen Simulation und Empirie im (nicht näher definierten) ‚relevanten Belastungsreich‘, jedoch zu keiner Übereinstimmung in allen Bereichen. Die ist beispielhaft für eine Zufahrt eines Kreisverkehrs in Abbildung 29 dargestellt. [BRILON & GEPPERT, 2015c]

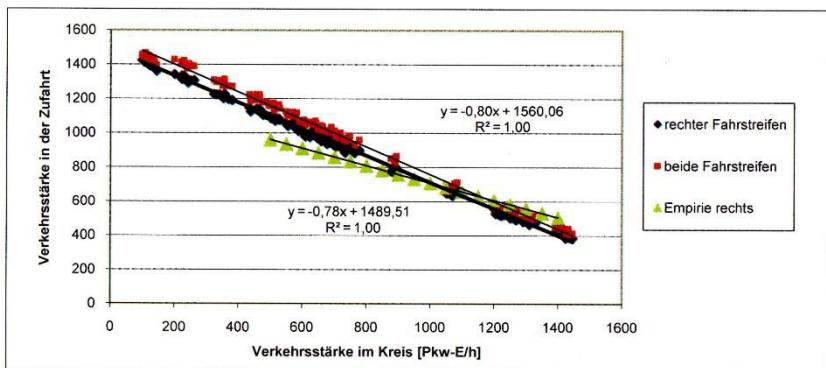


Abbildung 29: Vergleich der Ergebnisse von Simulationsergebnissen mit der empirisch ermittelten Kapazität [BRILON & GEPPERT, 2015c]

BRILON & GEPPERT [2015c] führen dies auf die Verwendung einheitlicher Parameter für Weglücken, Zeitlücken und Abstandsverhalten zurück, weisen dabei aber auch darauf hin, dass keine empirischen Anhaltspunkte vorliegen, die eine Verkehrsabhängigkeit dieser Parameter rechtfertigen.

Die oben beschriebenen Punkte müssen sowohl bei dem Design des Simulationsexperiments als auch bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Sie sind jedoch kein Ausschlusskriterium zur Nutzung von „PTV Vissim“, da nicht zu erwarten ist, dass andere Simulationssoftwares die Problematik grundlegend lösen. Sollten im weiteren Verlauf keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden können, so sind zumindest qualitative Vergleiche zwischen den Fahrweisen möglich, insbesondere im „relevanten Bereich“, der dahingehend noch einer Definition bedarf.

### 5.3 Kapazitätsanalyse in „PTV Vissim“

Das „PTV Vissim“-Handbuch [PTV Group, 2024] nennt die Kapazitätsanalyse als eine der potenziellen Einsatzmöglichkeiten. Jedoch bietet die Software nicht die Möglichkeit diese systematisch „auf Knopfdruck“ durchzuführen, vielmehr bedarf es hierzu mehrerer Schritte.

Für den einfachen Fall einer einzelnen definierten Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn wird systematisch die Verkehrsmenge in der Zufahrt erhöht, bis die Kriterien zur Erreichung der Kapazität erfüllt sind. Wird der Grundwert, von dem aus die Verkehrsmenge in der Zufahrt erhöht wird, sinnvoll gewählt, können hierbei auch Aussagen über die Grenzen für die im HBS definierte ‚Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs‘ (QSV) getroffen werden.

Für den komplexeren Fall der Kapazitätsanalyse eines Bereiches werden diese Schritte mehrfach wiederholt, idealerweise automatisiert. Dabei gibt es verschiedene denkbare Ansätze.

### **Ansatz 1:**

Für einzelne Zufahrten ist es eine Möglichkeit, nach Festsetzen der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn ( $q_K$ ) die Verkehrsstärke in der Zufahrt ( $q_Z$ ) von Null an sukzessive zu erhöhen. Dabei sollte aufgrund der in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Unterschiede zwischen HBS und Simulation die Erhöhung von  $q_Z$  auf einen Wert oberhalb der nach HBS berechneten Grundkapazität erfolgen. Nach Erreichen der Kapazität wird  $q_K$  erhöht und das Prozedere mehrfach wiederholt, bis der gewünschte Bereich analysiert ist. Für eine Schrittweite von jeweils 200 Fz/h für  $q_K$  und  $q_Z$  ergeben sich die in Abbildung 30 dargestellten Kombinationen von Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und Verkehrsstärke in der Zufahrt, im Weiteren als ‚Lastfälle‘ deklariert.

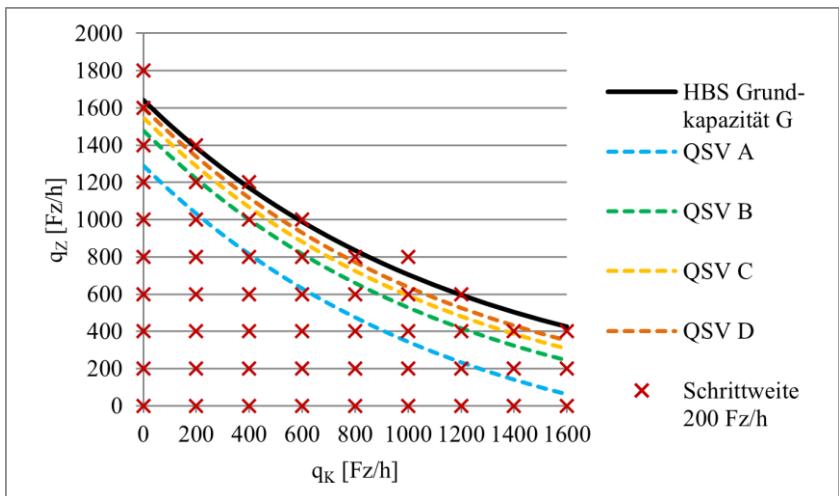


Abbildung 30: Potenzielle Lastfälle für das Simulationsexperiment

Bei (beispielhaft) 30 Simulationsläufen (mit unterschiedlichen Startzufallszahlen) je Lastfall ergibt sich bei gleicher Schrittweite für die Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und der Zufahrt die in Tabelle 6 aufgelistete Anzahl an Simulationen je betrachteter Fahrweise. Dabei ist aus Abbildung 30 zum einen abzuleiten, dass die Wahl einer großen Schrittweite für  $q_Z$  insbesondere Bereiche nahe der Kapazitätsgrenze unbedacht lässt, die aber gerade interessant sind. Zum anderen zeigt Tabelle 6 ein schnelles Anwachsen der Anzahl an Simulationen bei der Wahl geringerer Schrittweiten und damit eine enorme Erhöhung des Rechenaufwands, der zudem überwiegend für weniger interessante Bereiche eingesetzt wird.

Tabelle 6: Anzahl der Simulationen je betrachteter Fahrweise

Schrittweite [Fz/h]	Anzahl Simulationen
50	20.700
100	5.370
150	2.400
200	1.425

**Ansatz 2:**

Eine andere Möglichkeit der strukturierten, sukzessiven Analyse besteht darin, den Untersuchungsbereich einzugrenzen, z. B. auf einen festen Wert unter- und oberhalb der (bislang bekannten) Kapazität. Hierbei bleiben einerseits jedoch ggf. Auslastungsgrade mit QSV A bei geringen Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn unbeachtet. Andererseits werden oberhalb der Grundkapazität unnötig viele Simulationen durchgeführt.

Als besser geeignet erscheint daher eine Betrachtung von definierten Auslastungsgraden auf Basis der rechnerischen Grundkapazität nach HBS. VORTISCH et al. [2020] nutzen hier die Auslastungsgrade 50 %, 75 %, 90 %, 100 % und 110 % bei Verkehrsstärken des Hauptstroms von 0 bis 1.600 Fz/h mit Schritten von 200 Fz/h, vgl. Abbildung 31. Größere Verkehrsstärken sind in den Diagrammen des HBS nicht dargestellt und werden zunehmend unge- nauer [VORTISCH et al., 2020].

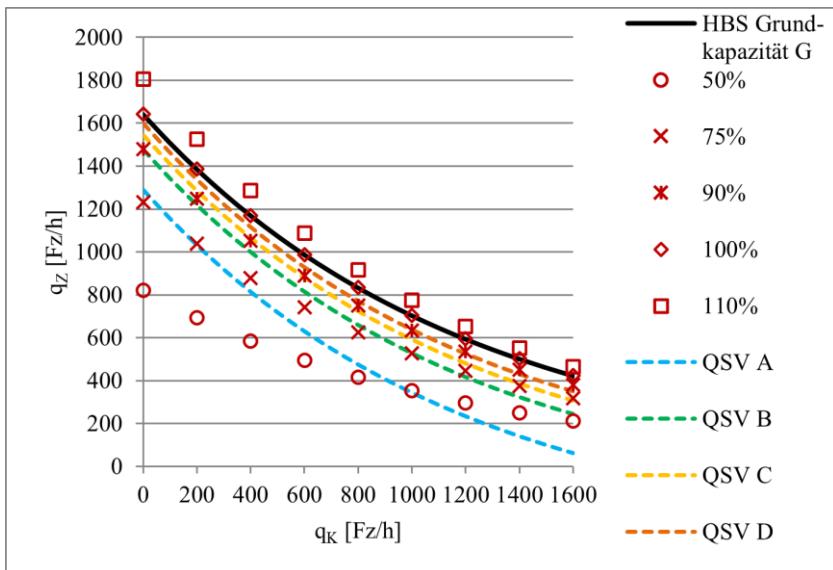


Abbildung 31: Darstellung der Lastfälle und Obergrenzen für verschiedene QSV für einen 2/2-KV (Darstellung in Anlehnung an [VORTISCH et al., 2020])

Ein Auslastungsgrad von 50 % deckt einen Bereich ab, in dem sich die QSV A und QSV B befinden. Eine Betrachtung geringerer Auslastungsgrade erscheint nicht zielführend. Im Bereich hoher Auslastungsgrade sind die benutzten Werte von 100 % und 90 % gut gewählt, die QSV bewegen sich zwischen den Bereichen C und E. Ab einem Auslastungsgrad von 95 % bewegt sich die QSV durchgehend in den Bereichen D oder E. Es ist jedoch fraglich, ob eine Untersuchung geringerer Schrittweiten zielführend ist, da zu kleine Schritte die Gefahr bergen, falsche Schlussfolgerungen aus einer Pseudogenauigkeit zu ziehen. Auslastungsgrade zwischen 50 % und 90 % zeigen eine Verteilung auf verschiedene QSV, wobei der von VORTISCH et al. [2020] gewählte Auslastungsgrad von 75 % hier als gut geeignet erscheint.

In Summe könnten somit in dem Simulationsexperiment insgesamt fünf verschiedene Auslastungsgrade für neun verschiedene Verkehrsstärken des Hauptstroms  $q_K$  betrachtet werden. Für jede dieser Kombinationen sind

mehrere Simulationsläufe mit verschiedenen Startzufallszahlen durchzuführen. Bei jeweils 30 Simulationsläufen bzw. Startzufallszahlen ergibt dies für jede der betrachteten Verkehrsregelungen eine Anzahl von 1.350 Simulationsläufen. Nicht mit einberechnet sind hierbei verschiedene Konstellationen der Haupt- und Nebenrichtung, die verschiedenen Verteilungen der Fahrzeuge auf die beiden Fahrstreifen bedingen sowie eine gesamtheitliche Betrachtung des Knotenpunktes.

### **Ansatz 3:**

Alternativ ist eine Kapazitätsermittlung in Anlehnung an die Untersuchungen von GEISTEFELDT et al. [2017] denkbar. Hierbei werden die Belastungsverhältnisse festgesetzt und die Gesamtverkehrsstärke sukzessive gesteigert, bis die Kapazität erreicht ist, vgl. Abbildung 32. Dies erscheint für die vorliegende Fragestellung praktikabler. Die Darstellung weicht jedoch methodisch bedingt (Betrachtung des gesamten Kreisverkehrs und festgesetzte Verteilung HR/NR) von der Darstellung des HBS ab und bildet zudem lediglich jeweils einen Fahrstreifen einer Zufahrt ab.

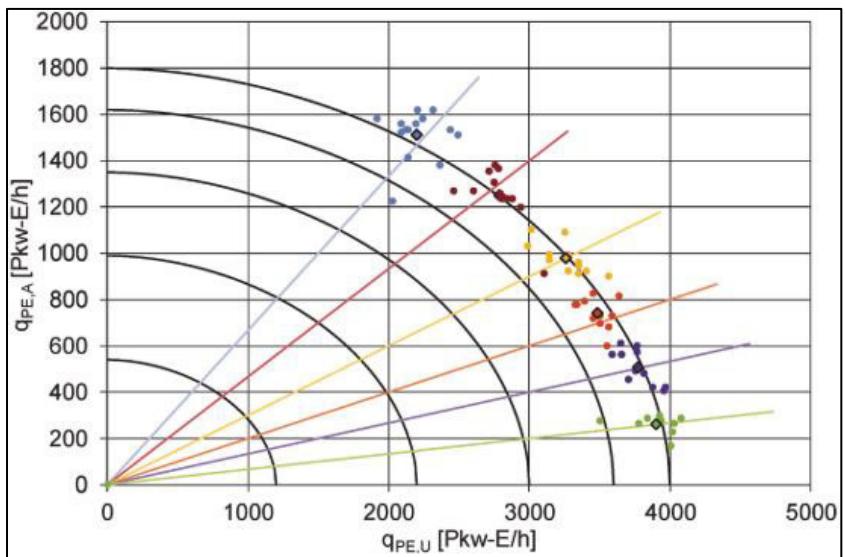


Abbildung 32: Ermittlung der Kapazität an einer einstreifigen Ausfahrt an einer zweistreifigen Hauptfahrbahn einer Autobahn anhand verschiedener Belastungsverhältnisse [GEISTEFELDT et al., 2017]

Konkret kann eine mittels „MS Excel“ automatisierte Kapazitätsanalyse in „PTV Vissim“ für die vorliegende Fragestellung, wie in Abbildung 33 dargestellt, aussehen. Das ganze Prozedere der Kapazitätsanalyse muss für beide Fahrweisen durchgeführt werden.

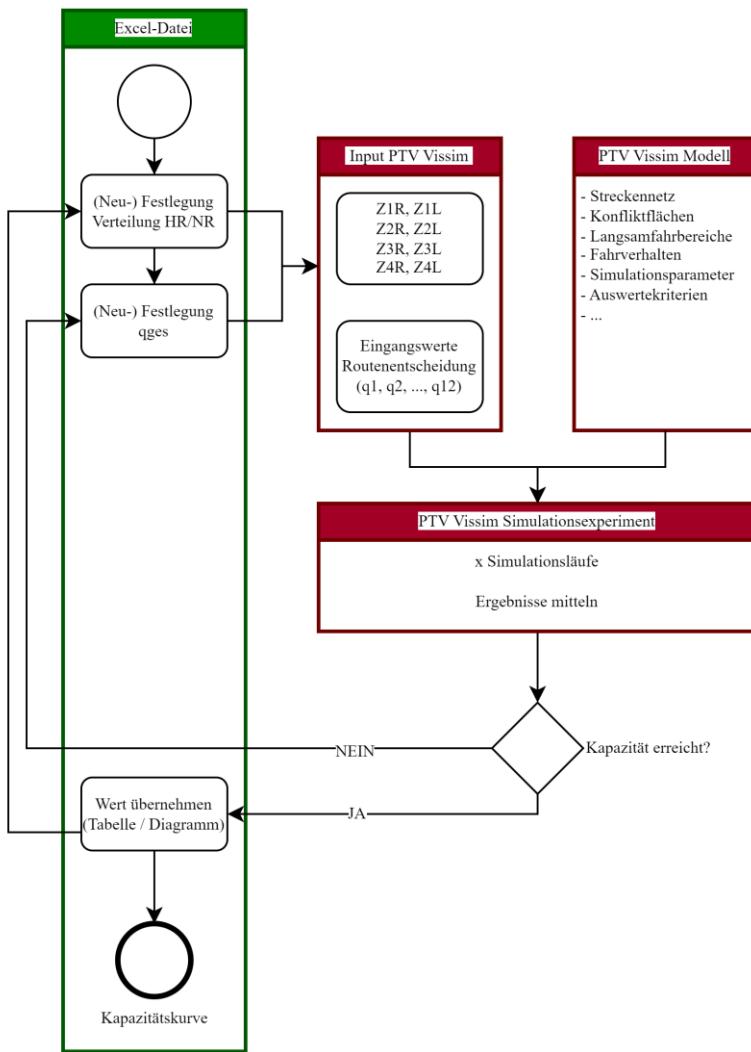


Abbildung 33: Schematische Darstellung der Untersuchungsschritte bei der Kapazitätsanalyse mittels „PTV Vissim“ und „MS Excel“

Ohne empirische Daten aus der Praxis bzw. der Realität erfolgt eine rein theoretische Betrachtung ohne Evaluierung des realen Fahrverhaltens. Denkbar wäre in diesem Fall das Simulationsmodell falls möglich auf beispielsweise das HBS oder eine der Berechnungsmethoden aus den Kapiteln 4.4 und 4.5 zu kalibrieren oder eine breit ausgelegte Variation von Simulationsparametern vorzunehmen, um eine große Bandbreite an Ergebnissen vergleichen und qualitative Aussagen über die zu erwartenden Kapazitätsunterschiede treffen zu können.

Das reale Fahrverhalten ist jedoch insbesondere in den „Verflechtungsbereichen“ bzw. in den Bereichen der Ausfahrten von großem Interesse, da hierzu derzeit keine Daten verfügbar sind. Jedoch ist in diesen Bereichen, in Abhängigkeit davon, ob die Fahrzeuge tatsächlich vor dem Ausfahren verflechten oder ein anderes Fahrverhalten aufweisen, ein signifikanter Unterschied zu erwarten. Von weiterem Interesse ist die real beobachtete Verteilung der Verkehrsströme bei einer gegebenen Gesamtverkehrsbelastung und die darauf basierende Untersuchung wie sich die Anwendung der Fahrweisen 1 und 2 auf die Verkehrsqualität auswirkt.

# 6 Verkehrsuntersuchung

## 6.1 Allgemeines

Die Verteilung der Verkehrsströme auf die jeweiligen Fahrstreifen der Zufahrten sowie der Kreisfahrbahn sind in der Theorie anhand der betrachteten Fahrweisen ableitbar. Des Weiteren ist aus den gängigen Regelwerken die durchschnittliche Nutzung des linken Fahrstreifens zweistreifiger Zufahrten bekannt. Allerdings ist auch bekannt, dass die Annahme des linken Fahrstreifens unter anderem stark von der Verkehrsbelastung der Zufahrt bzw. der Auslastung des rechten Fahrstreifens abhängt [BRILON & GEPPERT, 2010]. Für die vorliegende Fragestellung sollen exemplarisch real beobachtete Verhältnisse simuliert und den theoretischen Annahmen gegenübergestellt werden. Ziel ist es, die Verteilung der einzelnen Verkehrsströme auf die Fahrstreifen der Zufahrten und der Kreisfahrbahn zu ermitteln und diese den theoretischen Verteilungen der Fahrweisen 1 und 2 gegenüberzustellen. Zweiter Schwerpunkt ist es, darüber Kenntnisse zu erlangen, wie die Bewegungen innerhalb des Kreisverkehrs und insbesondere auch bei der Ausfahrt aus diesem in der Realität erfolgen. Dies ist von grundlegender Bedeutung, da es in „PTV Vis-sim“ eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten gibt, aus denen ein Modell aufgebaut werden kann und die Modellbildung unweigerlich die Qualität der Ergebnisse beeinflusst. Hierzu können sogenannte „Trajektorien“ dienen, die in diesem Kontext als „Bewegungslinien“ der Fahrzeuge definiert werden können.

Eine Literaturrecherche zeigt, dass es im Zuge der Forschung zum autonomen Fahren zunehmend mehr Erhebungen und Veröffentlichungen gibt, die sich mit der Ermittlung der Trajektorien von manuell geführten Fahrzeugen beschäftigen. Die Inhalte fokussieren jedoch stark auf Fragestellungen der Fahrzeugtechnik, wie z. B. Sicherheitsaspekte (z. B. [POPP, 2023]) oder Trajektorienplanung autonomer Fahrzeuge (z. B. [GRAF, 2021; LAMPRECHT et al., 2021]). Werden Trajektorien manuell geführter Fahrzeuge erhoben, dann in der Regel nicht an zweistreifig befahrbaren Kreisverkehren. JIANG et al. [2024] unterstreichen dies und ermitteln im Rahmen ihrer Recherche eine

deutlich größere Zahl an Veröffentlichungen, die sich auf die makroskopische Ebene (z. B. Verkehrsfluss, Kapazität und Optimierung von Lichtsignalanlagen) beziehen, als auf die mikroskopische Ebene (z. B. Konfliktpunkte, Verlustzeiten, Trajektorien).

Lediglich KRAJEWSKI, MOERS, BOCK et al. [2020] beschäftigen sich mit der Erhebung und Auswertung der Trajektorien an Kreisverkehren, in diesem Fall mittels Drohnenaufnahmen. Die daraus extrahierten Daten werden von den Autoren als OpenData für Forschungszwecke zur Verfügung gestellt. [KRAJEWSKI, MOERS, BOCK et al., 2020] Von den insgesamt drei untersuchten Kreisverkehren ist auch ein zweistufig befahrbarer Kreisverkehr in der Untersuchung enthalten, der vier zweistufige Zufahrten aufweist. Allerdings ist der Kreisverkehr auch mit vier Bypässen ausgestattet, wodurch er sich deutlich von einem Standardkreisverkehr unterscheidet (vgl. Abbildung 34) und dadurch auch ein davon abweichendes Nutzungsverhalten vermuten lässt.



Abbildung 34: Kreisverkehr in Alsdorf-Neuweiler bei Aachen [KRAJEWSKI, MOERS & BOCK, 2020]

Eine stichprobenartige Sichtung von vier Intervallen zeigt, dass erwartungsgemäß alle Rechtsabbieger die Bypässe benutzen, die Kreisfahrbahn also

lediglich von den geradeausfahrenden und den linksabbiegenden Fahrzeugen genutzt wird, die linken Fahrstreifen der Zufahrten erfahren nahezu keine Nutzung, vgl. Abbildung 35. Dadurch entspricht das Nutzungsverhalten eher dem eines einstreifigen Kreisverkehrs, sodass die Daten für die vorliegende Arbeit und die Fragestellung nicht verwendet werden können.

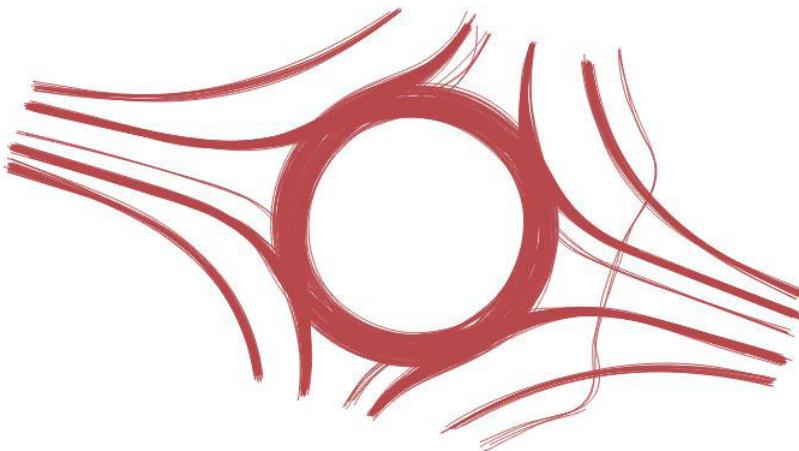


Abbildung 35: Aus den OpenSource-Daten [KRAJEWSKI, MOERS & BOCK, 2020] erzeugte Trajektorien eines erhobenen Intervalls

Die erforderlichen Daten müssen demnach selbst erhoben werden. Grundlage für die Verkehrsuntersuchung sollen Videoaufnahmen sein, da diese Erhebungsmethode die meisten Vorteile für die Fragestellung mit sich bringt. Für das Verständnis der äußerst komplexen Vorgänge an zweistreifigen Kreisverkehren erscheint dies sogar als die einzige brauchbare Erhebungsmethode. [WACHSMANN, 2016] Zudem sind die daraus ermittelten Messungen und Ergebnisse nachvollziehbar und reproduzierbar.

Durch WACHSMANN [2016] und NOACK [2019] wurden bereits zweistreifige Kreisverkehre per Videoaufnahmen untersucht und soweit möglich ausgewertet. Aus diesen Aufnahmen lassen sich jedoch lediglich bedingt

Aussagen zum Fahrverhalten respektive den Trajektorien treffen, da hierfür der Kreisverkehr im Gesamten betrachtet werden muss. Die dort zugrunde liegenden Aufnahmen zeigen hingegen lediglich einen begrenzten Ausschnitt, da die Kamera lediglich auf eine Höhe von rund 6 m gebracht werden konnte. Dadurch ist in der Regel nur eine Zufahrt und ein kleiner Bereich der Kreisfahrbahn im Vordergrund gut zu erkennen, der gesamte Zulauf hätte mit einer separaten Kamera dokumentiert werden müssen. Hinzu kommt, bedingt durch die Brennweite der Kamera, dass ferner liegende Objekte optisch bedingt deutlich kleiner erscheinen und eine Interpretation fehlerbehaftet sein kann. Abbildung 36 und Abbildung 37 veranschaulichen dies.



Abbildung 36: Ausschnitt der Filmaufnahmen in Weinstadt-Endersbach [WACHSMANN, 2016]



Abbildung 37: Ausschnitt der Filmaufnahmen in Königsbrunn, Kamera 2 [NOACK, 2019]

Mit Blick auf die oben definierten Ziele und Anforderungen erfolgt eine Beobachtung des Knotenpunktes idealerweise aus der Vogelperspektive. Dies stellt technisch heutzutage durch den Einsatz einer oder mehrerer Drohnen kein Problem mehr dar. Für die Erstellung der Aufnahmen wurde ein externer Dienstleister beauftragt, der sich zudem um die notwendigen Genehmigungen und die Einhaltung der rechtlichen Aspekte gekümmert hat.

Als Untersuchungsobjekt wurde der „Pullacher Kreisel“ bei Bad Aibling in Bayern gewählt. Dieser ist im Zuge der Staatsstraße St 2078 verortet (Netzknoten 8138043) und ist nach BRILON & BÄUMER [2004] seit dem Jahr 1997 in Betrieb. Im Osten findet sich in rund 3,5 km Entfernung der Netzknoten 8138013, im Westen in ca. 2,3 km Entfernung der Netzknoten 8137017. Beide Knotenpunkte sind signalisiert. Im Süden schließt die Staatsstraße St 2089 an, die in ca. 3,2 km Entfernung an die Bundesautobahn A 8 anschließt (Anschlussstelle 100 Bad Aibling, Netzknoten 8138020). Der Knotenpunkt ist ebenfalls signalisiert. Im Norden schließt die „Rosenheimer Straße“ an, welche als Gemeindestraße klassifiziert ist. Der nächste Knotenpunkt befindet sich innerorts in rund 650 m Entfernung, dieser ist unsignalisiert.

Die Lage im Straßennetz ist in Abbildung 38 dargestellt.



Abbildung 38: Lage des „Pullacher Kreisel“ im Straßennetz [Bayerische Straßenbauverwaltung, 2023]

Die Knotenpunktarme der drei Staatsstraßen sind mit zweistreifigen Zufahrten angelegt. Die Zufahrt der Gemeindestraße ist einstreifig ausgeführt und weist zudem eine plangleiche Querungsmöglichkeit für den Fuß- und Radverkehr auf. Der Außendurchmesser beträgt 69 m, bezogen auf die Fahrbahnrandmarkierung, die Breite der Kreisfahrbahn beträgt 9 m. Der Kreisverkehr befindet sich in Außerortslage. Die Daten aus der Straßenverkehrszählung 2021 zeigen, dass der Kreisverkehr eine relativ hohe Gesamtverkehrsbelastung aufweist (vgl. Abbildung 40). Hierbei ist kritisch anzumerken, dass der Außendurchmesser zwar die Obergrenze von 60 m nach FGSV [2006b] überschreitet, dadurch jedoch keine nennenswerten Auswirkungen auf die gefahrenen Geschwindigkeiten und lediglich geringe Auswirkungen auf die Kapazität zu erwarten sind. [FGSV, 2006b] Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zudem zu berücksichtigen, dass „*die bei großen Außendurchmessern weiter auseinanderliegenden Entscheidungspunkte .. den Verkehrsablauf [erleichtern]*“ [FGSV, 2006b].



Abbildung 39: Luftaufnahme des ‚Pullacher Kreisels‘ aus Richtung Westen [XMS eXpert Media Solutions, 2023]



Abbildung 40: Ergebnisse der Straßenverkehrszählung 2021, mit Bezug zum ‚Pullacher Kreisel‘ [Bayerische Straßenbauverwaltung, 2023]

## 6.2 Erstellung der Videoaufnahmen

Die Videos wurden am 16.11.2023 im Zeitraum von ca. 07:00 Uhr bis 10:00 Uhr aufgenommen. Die Aufnahmen erfolgten in 4K Auflösung (3840 px x 2160 px) mit 30 fps (frames per second) aus einer Höhe von rund 120 m, die Drohne flog dabei mittig über der Kreisinsel. Mit der eingesetzten Kamera wurde ein Bereich von ca. 180 m x 100 m erfasst. Es konnte keine lückenlose Erfassung erfolgen, da die Drohne zum Wechseln der Akkus alle 25 min bis 30 min gelandet werden musste.

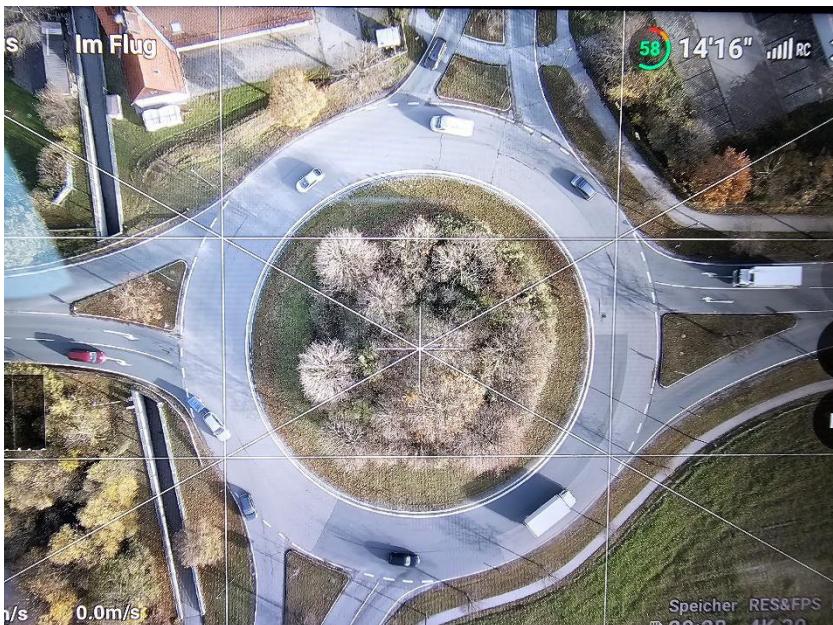


Abbildung 41: Ausrichtung der Drohne mittig über der Kreisinsel [XMS eXpert Media Solutions, 2023]

Zum Einsatz kamen zwei Drohnen der Typen DJI Mini Pro 3 und DJI Mini Pro 4. Die einzelnen Videos sind auf eine Länge von 05:25 min bzw.

05:23 min begrenzt. Die Zeit ergibt sich aus einer Beschränkung der Dateigröße der FAT32-Formatierung.

Insgesamt wurden 24 von insgesamt 33 Videos für die Auswertung herangezogen, in Summe rund 130 min. Jedem Video wird zur eindeutigeren und einfacheren Handhabung eine Intervall-Nummer zugeordnet (vgl. Tabelle 7, erste Spalte). Ein Video konnte nicht zur Auswertung dienen, da die Drohne während der Aufnahme startete, anschließend nicht konstant über dem Kreismittelpunkt flog und sich viel bewegte und drehte. Acht Videos wurden aussortiert, da die Aufnahmelängen zu kurz waren. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Videos und die auswertbaren Zeiträume. Im Zuge der Datensichtung wurde auch geprüft, ob unter Berücksichtigung der zu kurzen Videos durch Videoschnitt eine Unterteilung in 5 min-Intervalle möglich wäre, um die Anzahl der zur Verfügung stehenden Intervalle zu vergrößern (vgl. letzte Spalte in Tabelle 7). Dies war jedoch nicht möglich.

Tabelle 7: Übersicht über auswertbare Zeiträume

Intervall-Nr.	Video	Dauer	Zeit von	Zeit bis	Länge Zeitblock	Mögliche 5 min Intervalle
1	DJI_20231116070348_0001_D	00:05:25	07:03:48	07:09:13	00:16:37	3,32
2	DJI_20231116070914_0002_D	00:05:25	07:09:14	07:14:39		
3	DJI_20231116071440_0003_D	00:05:25	07:14:40	07:20:05		
4	DJI_20231116072006_0004_D	00:00:22	07:20:06	07:20:28		
<b>Flugpause</b>						
5	DJI_20231116072248_0005_D	nicht auswertbar	07:22:48	07:28:13	00:16:03	3,21
6	DJI_20231116072814_0006_D	00:05:25	07:28:14	07:33:39		
7	DJI_20231116073340_0007_D	00:05:25	07:33:40	07:39:05		
8	DJI_20231116073906_0008_D	00:05:13	07:39:06	07:44:19		
<b>Flugpause</b>						
9	DJI_20231116074846_0013_D	00:05:25	07:48:46	07:54:11	00:20:35	4,12
10	DJI_20231116075412_0014_D	00:05:25	07:54:12	07:59:37		
11	DJI_20231116075938_0015_D	00:05:25	07:59:38	08:05:03		
12	DJI_20231116080504_0016_D	00:04:20	08:05:04	08:09:24		
<b>Flugpause</b>						
13	DJI_0001	00:05:23	08:19:13	08:24:36	00:17:00	3,40
14	DJI_0002	00:05:23	08:24:37	08:30:00		
15	DJI_0003	00:05:23	08:30:01	08:35:24		
16	DJI_0004	00:00:51	08:35:23	08:36:14		
<b>Flugpause</b>						
17	DJI_0005	00:05:23	08:40:03	08:45:26	00:18:36	3,72
18	DJI_0006	00:05:23	08:45:26	08:50:49		
19	DJI_0007	00:05:23	08:50:50	08:56:13		
20	DJI_0008	00:02:27	08:56:13	08:58:40		
<b>Flugpause</b>						
21	DJI_0009	00:05:23	09:02:49	09:08:12	00:18:47	3,76
22	DJI_0010	00:05:23	09:08:13	09:13:36		
23	DJI_0011	00:05:23	09:13:36	09:18:59		
24	DJI_0012	00:02:38	09:18:59	09:21:37		
<b>Flugpause</b>						
25	DJI_0014	00:05:23	09:25:30	09:30:53	00:17:28	3,49
26	DJI_0015	00:05:23	09:30:53	09:36:16		
27	DJI_0016	00:05:23	09:36:17	09:41:40		
28	DJI_0017	00:01:19	09:41:40	09:42:59		
<b>Flugpause</b>						
29	DJI_0019	00:05:23	09:46:59	09:52:22	00:18:02	3,61
30	DJI_0020	00:05:23	09:52:22	09:57:45		
31	DJI_0021	00:05:23	09:57:45	10:03:08		
32	DJI_0022	00:01:53	10:03:09	10:05:02		
<b>Flugpause</b>						
33	DJI_0023	00:00:43	10:09:48	10:10:31	00:00:43	0,14
		Videomaterial gesamt	02:23:51			
		davon auswertbar/berücksichtigt	02:09:18			

### 6.3 Knotenpunktzählung

Da eine detaillierte Auswertung der Videos hinsichtlich der Verteilung der Verkehrsströme zum einen sehr aufwendig ist und zum anderen für weniger belastete Intervalle weniger Relevanz zu erwarten ist, werden in einem ersten Schritt die Intervalle mit der höchsten Verkehrsbelastung durch eine händische Zählung identifiziert. Gezählt werden alle Fahrzeuge, die im jeweiligen Intervall den Knotenpunkt vollständig passieren. Nicht berücksichtigt werden somit

Fahrzeuge, die sich zu Beginn des Intervalls bereits auf der Kreisfahrbahn befinden oder zum Ende des Intervalls die Ausfahrt noch nicht erreicht haben. Diese Festlegung entspricht der Knotenauswertung in „PTV Vissim“.

Wie oben beschrieben, haben die Videos eine technisch bedingte Länge von 05:25 min bzw. 05:23 min, was nicht den gängigen Intervalllängen von bspw. 5 min entspricht. Dennoch werden die Intervalle beibehalten und ausgewertet, da ein Zuschmitt der Videos einen erheblichen zusätzlichen Aufwand darstellen würde, der in Hinblick auf die Abbildung in „PTV Vissim“ zudem irrelevant wäre, da die Intervalllänge von 5:25 min 1:1 in „PTV Vissim“ abgebildet werden kann. Die Hochrechnung auf Stundenwerte erfolgt über den Faktor 11,1. Die Hochrechnung des letzten Videos des Zeitblocks (welches lediglich eine Länge von 5:13 min aufweist) erfolgt mit dem Faktor 11,5. Daraus ergeben sich die aus Abbildung 42 ersichtlichen [Fz/h]-Werte. Die Verteilung der Fahrzeuge auf die jeweiligen Fahrstreifen der Zufahrten ist in Abbildung 43 dargestellt. Dabei wird unterschieden in Fahrzeuge auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrten (RA) und Fahrzeuge auf den linken Fahrstreifen der Zufahrten (LA). Fahrzeuge des Schwerverkehrs (SV) werden zunächst den RA zugeordnet.

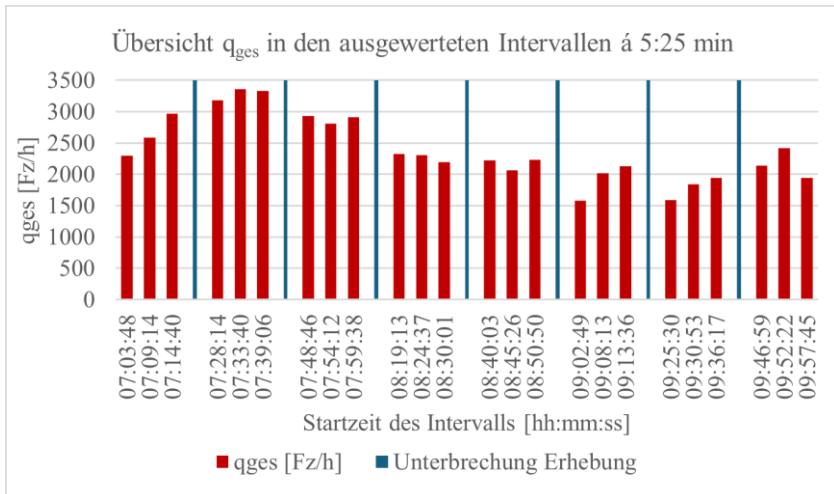


Abbildung 42: Übersicht über die Gesamtverkehrsstärke je erfasstem Intervall, umgerechnet in Fz/h

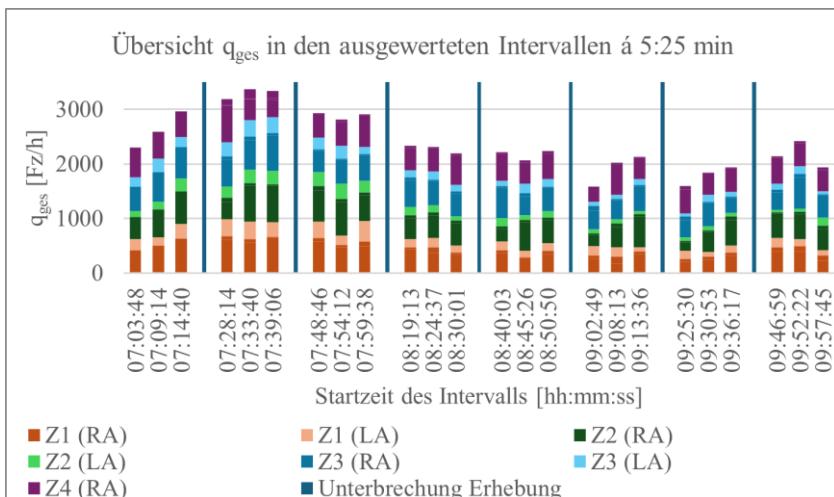


Abbildung 43: Übersicht über die Anzahl der Fahrzeuge in den Zufahrten und deren Aufteilung auf die einzelnen Fahrstreifen

Neben der Ermittlung der Verkehrsmengen gehört zu einer Knotenpunktzählung gemäß FGSV [2012] ebenfalls die Erfassung der Verkehrsströme. Durch die vorliegenden Videoaufnahmen ist es möglich, die Mengen der einzelnen Verkehrsströme getrennt nach linkem und rechtem Fahrstreifen der Zufahrten auszuwerten. Die Auswertung geht mit demselben Arbeitsschritt einher, mit dem die Trajektorien erfasst und ausgewertet werden. Wie aus der Erfassung der Trajektorien die Verkehrsströme und zugehörigen Verkehrsbelastungen ermittelt werden, ist in Kapitel 6.5 beschrieben.

Die detaillierte Auswertung erfolgt wie oben beschrieben für die drei Intervalle, die die höchste Verkehrsbelastung aufweisen, diese sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8: Überblick über Videos mit vollständiger Auswertung

Intervall-Nr.	Video	Dauer	Zeit von	Zeit bis
6	DJI-20231116072814_0006_D	00:05:25	07:28:14	07:33:39
7	DJI-20231116073340_0007_D	00:05:25	07:33:40	07:39:05
8	DJI-20231116073906_0008_D	00:05:13	07:39:06	07:44:19

Die Verkehrsströme sind exemplarisch für das Intervall 6 von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr in Abbildung 44 dargestellt, aufgeteilt in RA, LA und SV. Die Ergebnisse für die beiden anderen Intervalle finden sich in Anhang 2.

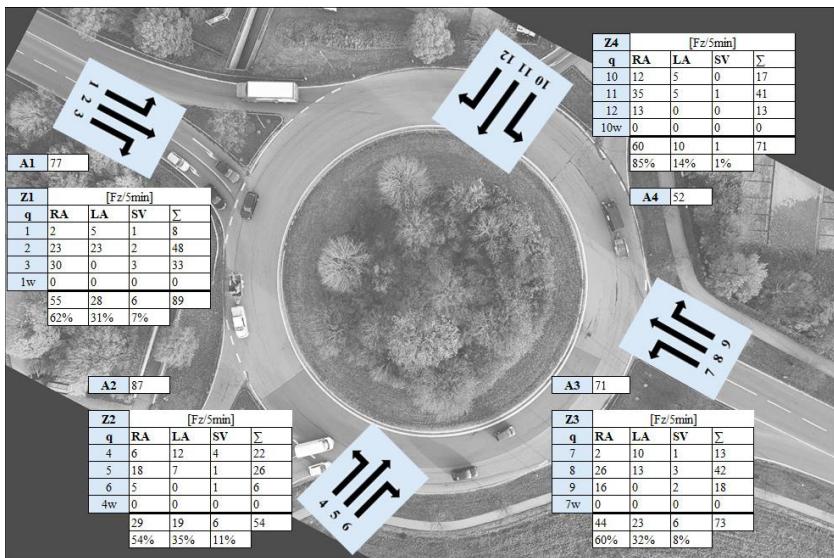


Abbildung 44: Ergebnisse der Verkehrszählung des Intervalls 06 von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr

Die so ermittelten Verkehrsbelastungen der einzelnen Verkehrsströme getrennt nach Fahrstreifen dienen als Eingangswerte für die Simulation und ermöglichen einen direkten Vergleich mit den beiden Fahrweisen.

## 6.4 Vergleiche zu den Fahrweisen 1 und 2

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Auswertung der Verteilung der Verkehrsströme auf die Fahrstreifen der zweistreifigen Zufahrten beispielhaft aufgezeigt. Dabei wird zwischen Linksabbiege-, Geradeaus- und Rechtsabbiegeströmen sowie zwischen Beobachtung und den theoretischen Werten der Fahrweisen 1 und 2 unterschieden. Der SV wird separat dargestellt, da dieser in der Beobachtung bis auf einzelne Ausnahmen den rechten Fahrstreifen benutzt hat und dies auch bei Anwendung der beiden Fahrweisen 1 und 2

darf/soll. Die Auswertung der beiden anderen Intervalle findet sich in Anhang 3.

### 6.4.1 Linksabbiegeströme

Abbildung 45 zeigt beispielhaft die Verteilung der Fahrzeuge des Verkehrsstroms q4 auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung des Verkehrsstroms unter Annahme der Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr.

Bei allen Linksabbiegern ist zu beobachten, dass diese gemäß Fahrweisen 1 und 2 den linken Fahrstreifen der Zufahrt und damit den inneren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn benutzen sollten. In den untersuchten Intervallen nutzten bis zu 57 % der beobachteten Pkw dennoch den rechten bzw. äußeren Fahrstreifen (vgl. Abbildung 45 und Abbildung 46).

Dies kann sich ggf. positiv auf den Verkehrsfluss auswirken, da weniger Fahrstreifenwechsel/Ausfahrten vom inneren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn aus vollzogen werden müssen. Jedoch kann sich dies auch negativ auf die Wartezeiten der Fahrzeuge in den nachfolgenden Zufahrten auswirken, die vom rechten Fahrstreifen der Zufahrt auf den äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn einfahren wollen, jedoch weniger Lücken finden als optimalerweise möglich.

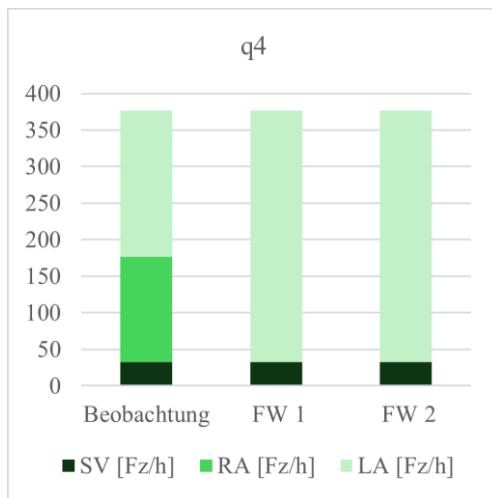


Abbildung 45: Verteilung des Verkehrsstroms q4 auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr

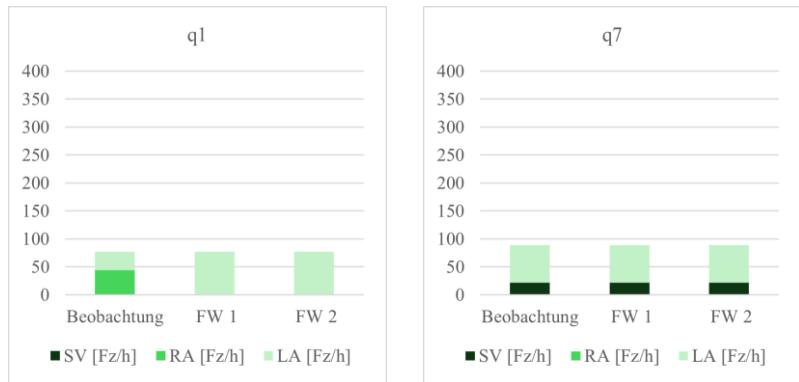


Abbildung 46: Verteilung der Verkehrsströme q1 (links) und q7 (rechts) auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr

## 6.4.2 Geradeausströme

Abbildung 47 zeigt beispielhaft die Verteilung der Fahrzeuge des Verkehrsstroms q2 auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr. Wie zu erkennen ist, würden bei strikter Anwendung der Fahrweise 1 alle Pkw den rechten Fahrstreifen benutzen, bei strikter Anwendung der Fahrweise 2 alle Pkw den linken Fahrstreifen. In den untersuchten Intervallen weisen die Geradeausströme eine Verteilung von rechtem zu linkem Fahrstreifen von 40,9 % zu 59,1 % bis 87,4 % zu 12,6 % auf. Die sich daraus ergebenden potenziellen positiven und negativen Aspekte entsprechen denen in Kapitel 6.4.1 beschriebenen.

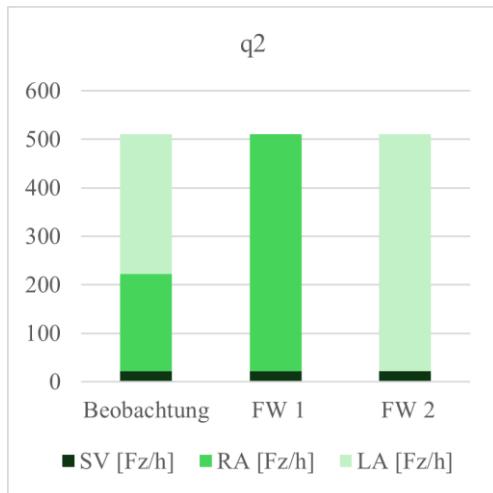


Abbildung 47: Verteilung des Verkehrsstroms q2 auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr

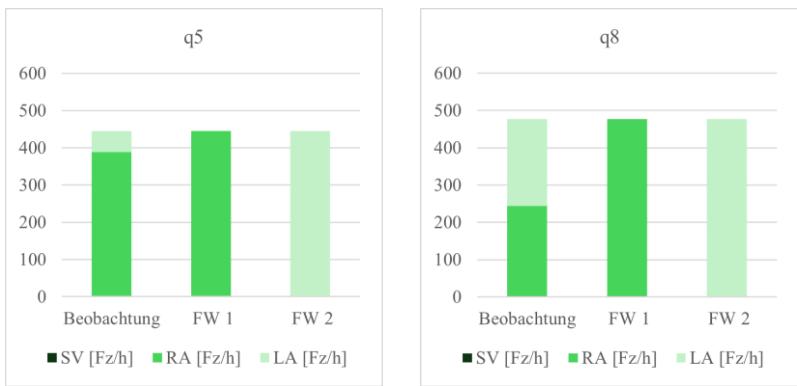


Abbildung 48: Verteilung der Verkehrsströme q5 (links) und q8 (rechts) auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr

### 6.4.3 Rechtsabbiegeströme

In Abbildung 47 ist beispielhaft die Verteilung der Fahrzeuge des Verkehrsstroms q3 auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr dargestellt.

Wie zu erwarten, gibt es bei den Rechtsabbiegeströmen keine Differenzen zwischen der Beobachtung und dem Soll-Verhalten der beiden Fahrweisen.

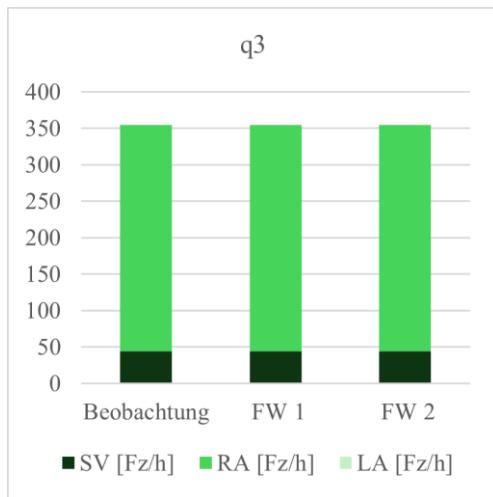


Abbildung 49: Verteilung des Verkehrsstroms q3 auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr

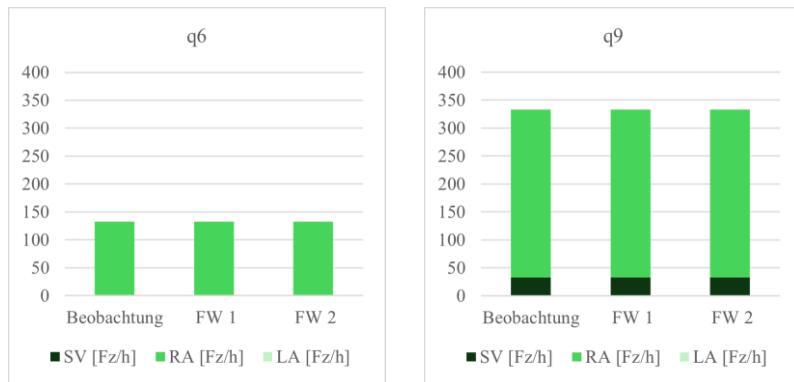


Abbildung 50: Verteilung der Verkehrsströme q6 (links) und q9 (rechts) auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr

## 6.5 Erstellung der Trajektorien

Für die in Kapitel 6.3 ausgewählten Intervalle soll die Ermittlung der Trajektorien Aufschluss darüber geben, wie das Fahrverhalten am untersuchten Knotenpunkt im Detail aussieht. Zudem soll anhand dieser eine einfache und dokumentierbare Ermittlung der jeweiligen Verkehrsströme erfolgen. Zwar gibt es zunehmend Bestrebungen und Lösungen um Trajektorien aus Videoaufnahmen automatisiert zu extrahieren, jedoch stand für die vorliegende Arbeit keine entsprechende Software zur Verfügung. Deshalb wurde auf die Open-Source-Software ‚Kinovea‘ zur Ermittlung der Trajektorien zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um eine Software, die ursprünglich für die Analyse von menschlichen Bewegungen im Sport entwickelt wurde. [CHARMANT & Mitwirkende, 2021] Ein großer Vorteil der Software ist, dass das Video auf die reale Geometrie kalibriert werden kann, wenn bspw. eine Länge einer Strecke in der Realität bekannt ist (vgl. Abbildung 51). Im Rahmen dieser Kalibrierung wird auch die Ausrichtung des Koordinatensystems im Video bestimmt (vgl. Abbildung 52).

Für die vorliegenden Videoaufnahmen werden in den Luftbildern Punkte gesucht, anhand derer sich die Kalibrierung durchführen lassen kann. Der Referenzpunkt des Koordinatensystems wird dabei in den ersten Punkt der erzeugten Linie gelegt. Für jedes Video muss dieses Vorgehen anfangs wiederholt werden, da die Drohnenaufnahmen durch die notwendigen Start- und Landemanöver nicht 100 % deckungsgleich sind. Ist der Flug der Drohnen zu unruhig (beispielsweise durch Wind) wäre es notwendig, die Videos in einem vorherigen Schritt zu stabilisieren. Das eigentliche Video bleibt bei der Auswertung in ‚Kinovea‘ unbearbeitet, jegliche Messungen und Anmerkungen werden in einer sogenannten Annotationsdatei gespeichert.



Abbildung 51: Kalibrierung des Videos anhand der Länge und Ausrichtung einer bekannten Strecke



Abbildung 52: Relatives Koordinatensystem aus Kalibrierung

Die Erfassung der Trajektorien erfolgt teilmanuell, indem händisch ausgewählt wird, von welchen Fahrzeugen die Bewegungsbahn verfolgt und an welchem Punkten das Tracking jeweils gestartet werden soll. Auch der Endpunkt der Bewegungsbahn wird manuell gewählt. Die Software trackt die Bewegung eines Objektes in einem definierten Bereich, bestehend aus einem Objekt- und einem Suchfenster, vgl. Abbildung 53. „Das Objektfenster sollte so klein wie möglich um den zu verfolgenden Punkt sein, um Interferenzen zu vermeiden. Das Suchfenster sollte groß genug sein, um die Position des Punktes im nächsten Frame zu erfassen, aber klein genug, um Interferenzen zwischen mehreren Markierungen zu vermeiden.“ [CHARMANT & Mitwirkende, 2021]



Abbildung 53: Objektfenster (inneres Rechteck) und Suchfenster (äußeres Rechteck) um ein Objekt

Für die vorliegenden Videos in der Auflösung 3840 x 2160 px, entsprechender Brennweite des Objektivs und Flughöhe der Drohne hat sich eine Größe von 50 x 50 px für das Objektfenster und 100 x 100 px für das Suchfenster als zielführend erwiesen. Gegenüber den Voreinstellungen wird die Genauigkeit augenscheinlich verbessert und ein „Wandern“ der Trajektorie (vgl.

Abbildung 54 und Abbildung 55) etwas eingeschränkt. Gleichzeitig wird ein Verlieren des Objekts zwischen den Frames verringert.

Als Objektmittelpunkt wurde bei Pkw die Mitte der Windschutzscheibe gewählt, bei Lkw das Dach des Führerhauses. Dennoch gelingt es nicht, dass Objekt- und Suchfenster während der Objektverfolgung am exakt gleichen Punkt am Fahrzeug bleiben. Die Abweichungen bewegen sich im Bereich einer Fahrzeugsbreite, sodass die Methodik für die Fragestellung als ausreichend genau erachtet wird.

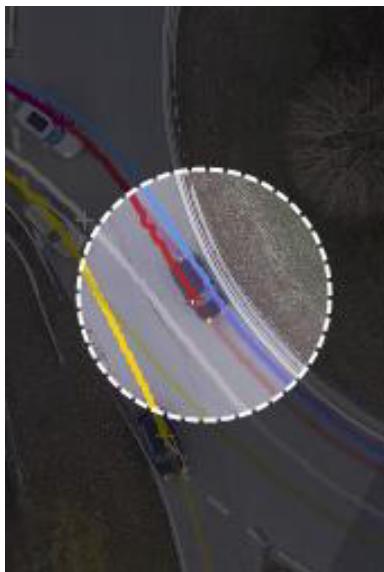


Abbildung 54: Tracking an der rechten Fahrzeugkante



Abbildung 55: Tracking an der linken Fahrzeugkante

Die Interpretation innerhalb von „Kinovea“ ist jeweils nur für einen begrenzten Zeitraum möglich. Der Übersichtlichkeit halber werden die Trajektorien nach Ende der Bewegungsverfolgung nach einer gewissen Zeit ausgeblendet.



Abbildung 56: Trajektorienerfassung in ‚Kinovea‘

Die Trajektorien können als solche auch nicht praktikabel zur weiteren Interpretation ausgegeben werden. Neben der Ausgabe als Einzelbilder, Bildsequenzen oder Videos gibt es jedoch die Möglichkeit, die Trajektorien als Tabelle zu exportieren. Dabei wird jede Trajektorie in einer eigenen Tabelle als Einzelpunkte innerhalb der Datei aufgelistet, vgl. Abbildung 57. In der ersten Spalte ist hierbei der Zeitstempel (T) hinterlegt, in den Spalten zwei und drei sind die x- und y-Koordinaten in cm ausgegeben. Damit liegen für jedes Frame die Informationen zur exakten Position des Fahrzeuges innerhalb des definierten Koordinatensystems vor.

```
#Kinovea Trajectory data export
#T X Y

# Trajektorien 1
0.00 -3153,96 1685,06
0.03 -3153,97 1685,05
0.07 -3153,97 1685,05
0.10 -3153,98 1685,04
0.13 -3153,98 1685,04
0.17 -3153,98 1685,05
0.20 -3153,97 1685,09
0.23 -3153,96 1685,13
0.27 -3153,95 1685,18
0.30 -3153,93 1685,25
```

Abbildung 57: Beispielhafte Darstellung der als Tabelle exportierten Trajektorien aus ‚Kinovea‘

Für die Interpretation der Daten kommt die Software ‚QGIS‘ zum Einsatz. Dabei handelt es sich um eine Open-Source-Software für geografische Informationssysteme (GIS). Dies bietet die Möglichkeit, alle innerhalb des Intervalls erzeugten Punkte aus den Trajektorien gleichzeitig darzustellen. Die ausgegebene Struktur der Daten kann in ‚QGIS‘ nicht direkt eingelesen werden, sodass hier vorab ein Zwischenschritt notwendig wird, um die Daten in die notwendige Struktur zu konvertieren und die Koordinaten in m umzurechnen. Dieser Zwischenschritt erfolgt durch einen in VBA programmierten Algorithmus und liefert das in Abbildung 58 dargestellte Ergebnis.

```
Nr;T;X;Y  
1;0;-31,5396;16,8506  
1;0,03;-31,5397;16,8505  
1;0,07;-31,5397;16,8505  
1;0,1;-31,5398;16,8504  
1;0,13;-31,5398;16,8504  
1;0,17;-31,5398;16,8505  
1;0,2;-31,5397;16,8509  
1;0,23;-31,5396;16,8513  
1;0,27;-31,5395;16,8518  
1;0,3;-31,5393;16,8525
```

Abbildung 58: \*.csv-Datei nach Konvertierung

Die Erfassung der Trajektorien erfolgt in zwei Annotationsdateien, getrennt nach einfahrenden Fahrzeugen auf dem linken und rechten Fahrstreifen der Zufahrten. Dies erleichtert eine spätere Interpretation der Daten. In ‚PTV Vis-sim‘ ist eine getrennte Auswertung nach Fahrzeugklassen möglich, sodass hier ein vergleichbarer Datensatz erzeugt werden kann. Die Auswertung in ‚PTV Vissim‘ und der Vergleich erfolgen in Kapitel 7.3.4 und 7.3.5.

Ergänzend zur Ausgabe der Koordinaten ist es möglich, die Momentangeschwindigkeiten für jedes Fahrzeug für jedes Frame auszugeben. Dies kann direkt in ‚Kinovea‘ in Diagrammen ausgegeben werden (vgl. Abbildung 59), jedoch auch in tabellarischer Form als \*.csv-Datei. Hierbei ist darauf zu achten, dass sich die Werte auf die absolute Zeit beziehen, damit die Geschwindigkeiten in einem separaten Schritt den bereits ausgegebenen x- und y-Koordinaten über den Zeitstempel zugeordnet werden können.

## 6 Verkehrsuntersuchung

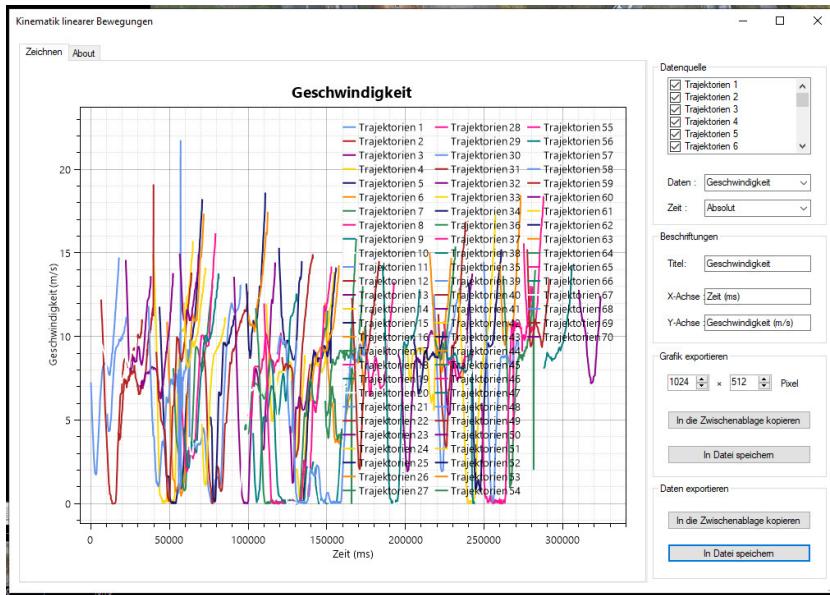


Abbildung 59: Grafische Ausgabe der Momentangeschwindigkeiten der einzelnen Trajektorien bezogen auf die absolute Zeit in [ms]

Nach teilautomatisierter Zuordnung der Momentangeschwindigkeiten zu den einzelnen Datenpunkte werden die Punkte in „QGIS“ eingelesen. Dabei lassen sich die Momentangeschwindigkeiten beliebig clustern und grafisch darstellen, vgl. Abbildung 60.

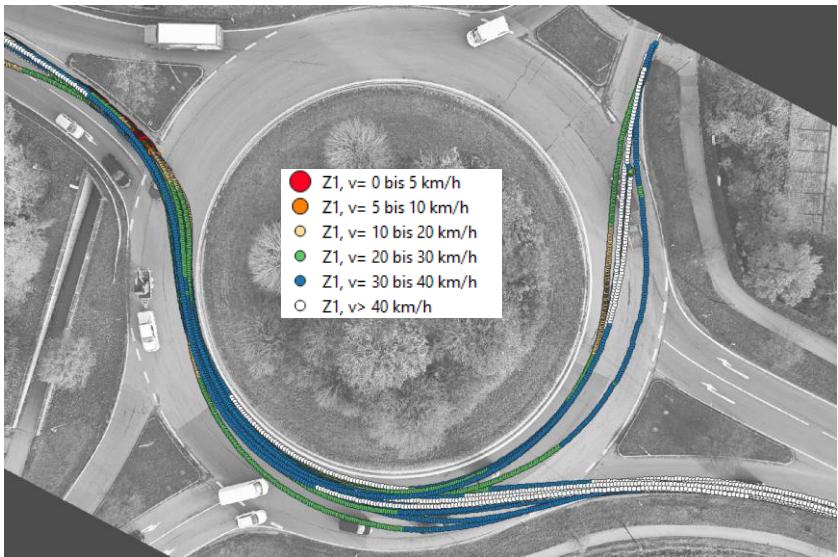


Abbildung 60: Darstellung der Datenpunkte in „QGIS“ mit hinterlegten Momentangeschwindigkeiten

## 6.6 Erkenntnisse

Die Zusammenführung in „QGIS“ bietet den großen Vorteil, dass alle Trajektorien eines Intervalls gemeinsam dargestellt werden können und den zugrunde liegenden Datenpunkten die Momentangeschwindigkeiten der Fahrzeuge zugeordnet sind. Hieraus sind zum einen Muster bei den Bewegungsabläufen innerhalb des Knotenpunktes, wie beispielsweise Fahrstreifenwechsel oder Ausfahrvorgänge erkennbar. Zum anderen dienen sie dazu, Bereiche zu identifizieren, in denen die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge gehäuft sinken. Allein auf Basis der erstellten Trajektorien ist es jedoch nicht möglich, vollumfängliche Aussagen zum Fahrverhalten zu treffen. Bspw. lassen sich die Interaktionen zwischen den Fahrzeugen ausschließlich in den entsprechenden Videoaufnahmen bewerten, unterstützt durch die überlagerten Trajektorien in „Kinovea“. Etwaige Ursachen von in der Trajektorienauswertung

identifizierten Bereichen mit reduzierten Geschwindigkeiten lassen sich ebenfalls in den Videoaufnahmen nachvollziehen.

### **6.6.1 Fahrzeuge auf den rechten Fahrstreifen der zweistreifigen Zufahrten**

Abbildung 61 zeigt die aus den Trajektorien extrahierten Datenpunkte der Fahrzeuge auf den rechten Fahrstreifen der zweistreifigen Zufahrten.

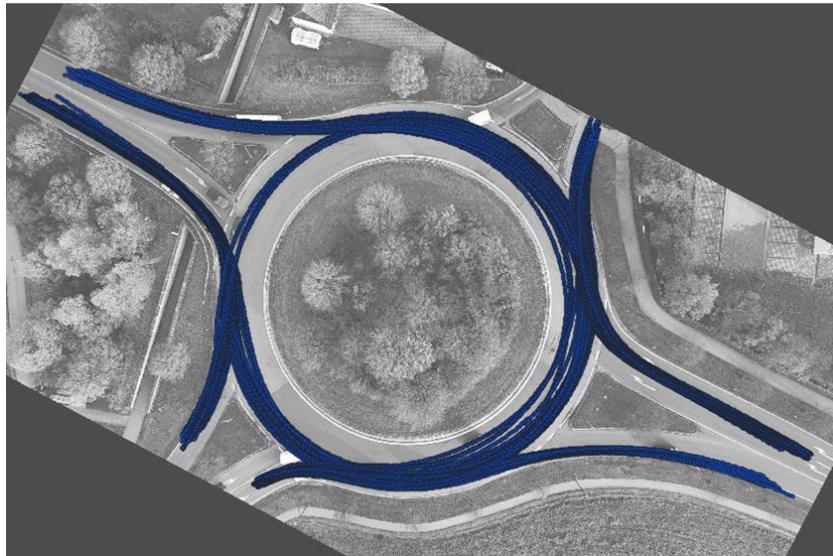


Abbildung 61: Trajektorien der Fahrzeuge auf den rechten Fahrstreifen der zweistreifigen Zufahrten (RA inkl. SV)

Es ist zu erkennen, dass die Fahrzeuge in der Regel sehr fahrstreifentreu fahren, auch obgleich die Kreisfahrbahn nicht markiert ist. Auf dem rechten Fahrstreifen ankommende Fahrzeuge nutzen in der Regel auch durchgängig den äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn bis zur Ausfahrt.

Hiervon sind jedoch vereinzelt Ausnahmen zu erkennen. Zum einen nutzen Sattelzüge häufig die gesamte Breite der Kreisfahrbahn (vgl. Abbildung 62), zum anderen fahren Fahrzeuge teilweise eine Art ‚Ideallinie‘, sofern die Verkehrssituation (im direkten Umfeld des Fahrzeuges) dies zulässt (Abbildung 63). Dies war auch schon bei WACHSMANN [2016] zu beobachten. Beide Verhalten sind in ‚PTV Vissim‘ nicht abbildbar.

Das bei den zweistreifigen Zufahrten vereinzelt zu beobachtende Fahren einer ‚Ideallinie‘ ist bei der einstreifigen Zufahrt Z4 in allen Intervallen häufiger zu beobachten. Generell sind jedoch keine signifikanten Abweichungen zu den oben beschriebenen Beobachtungen zu erkennen.

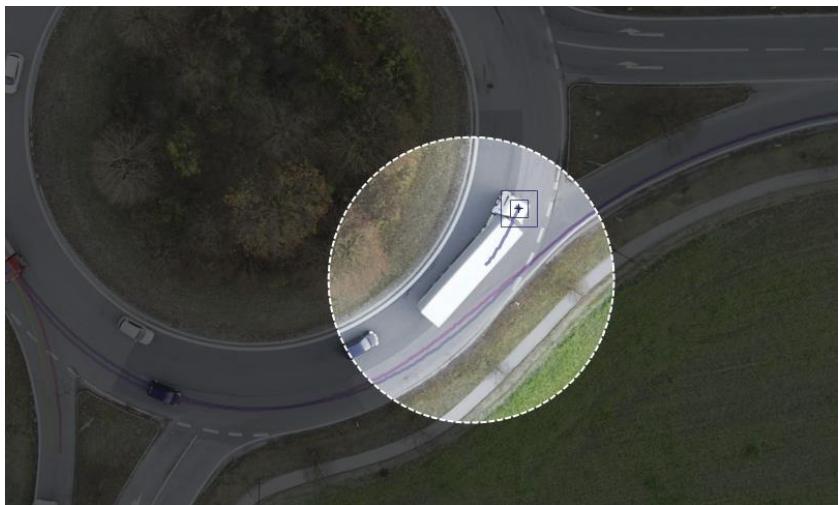


Abbildung 62: Sattelzug auf Kreisfahrbahn



Abbildung 63: Fahren der „Ideallinie“ bei geringer Verkehrsichte

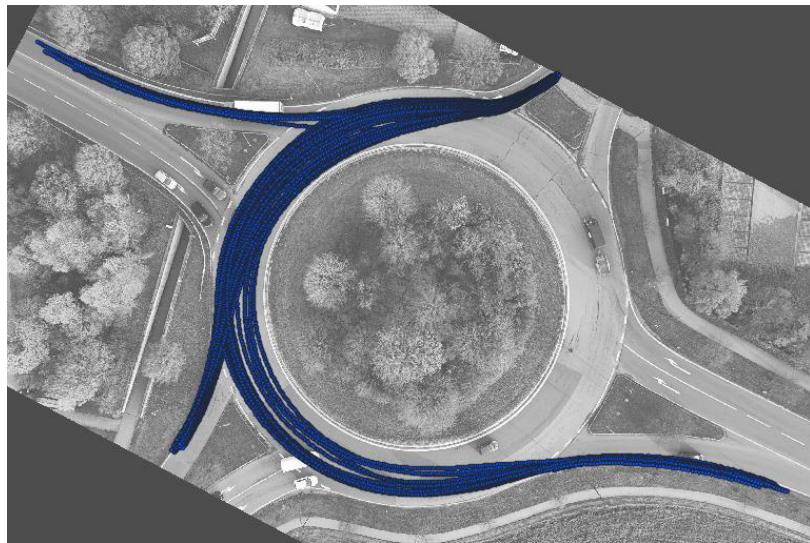


Abbildung 64: Trajektorien der Fahrzeuge der einstreifigen Zufahrt Z4

## 6.6.2 Fahrzeuge auf den linken Fahrstreifen der zweistreifigen Zufahrten

Abbildung 65 zeigt die aus den Trajektorien extrahierten Datenpunkte der Fahrzeuge auf den linken Fahrstreifen der zweistreifigen Zufahrten.

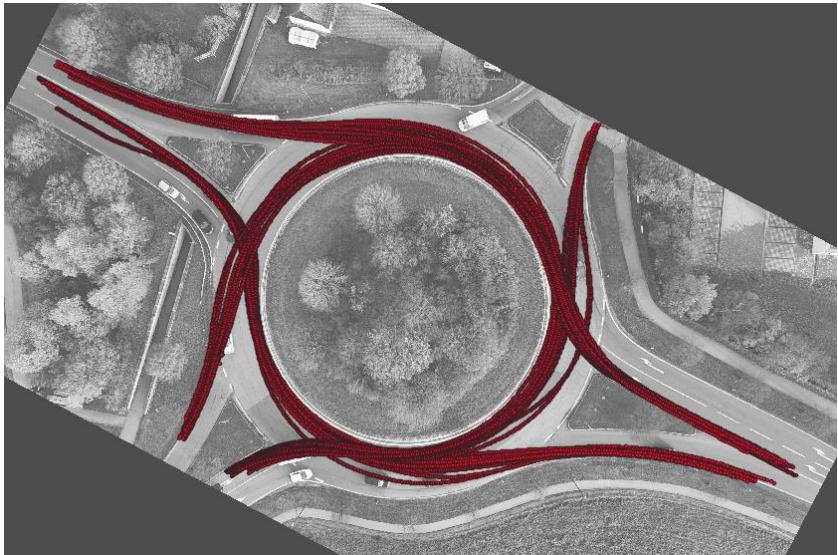


Abbildung 65: Trajektorien der Fahrzeuge auf den linken Fahrstreifen der zweistreifigen Zufahrten (LA)

Vielleicht wichtigste Erkenntnis für die Modellierung des Kreisverkehrs in „PTV Vissim“ ist, dass die Fahrzeuge bei der Ausfahrt aus dem Kreis in der Regel keinen Fahrstreifenwechsel vollziehen, sondern direkt vom inneren Fahrstreifen ausfahren. Dies geschieht augenscheinlich aus der Fahrdynamik heraus, die Form der Trajektorien erinnert an eine Wendelinie (vgl. Abbildung 66).

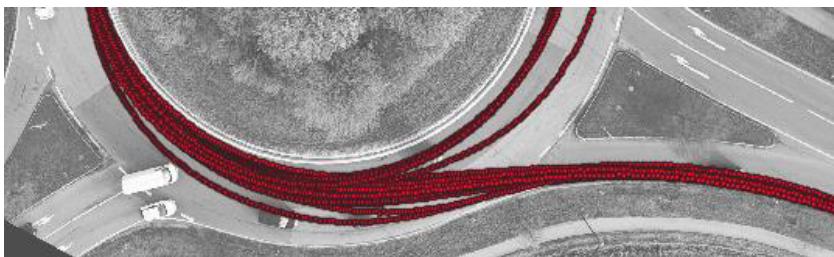


Abbildung 66: Trajektorien der vom inneren Fahrstreifen ausfahrenden Fahrzeuge

### 6.6.3 Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten

Die gefahrenen Geschwindigkeiten auf der Kreisfahrbahn finden sich in der Regel im Bereich zwischen 20 und 40 km/h. Bei ungehinderter Ausfahrt ist zu beobachten, dass hierbei bereits auf der Kreisfahrbahn beschleunigt wird. Eine statistische Auswertung hierzu ist nur bedingt möglich, da keine scharfe Einteilung in Bereiche aus den Daten erkennbar wird. Messungen an Querschnitten sind ebenfalls nicht zielführend, da diese stets eine Momentaufnahme liefern.

Von erhöhtem Interesse sind allerdings Regelmäßigkeiten, bei denen reduzierte Geschwindigkeiten erfasst werden. Hier kommt es verstärkt zu Interaktionen der Verkehrsteilnehmenden, was wiederum Rückschlüsse auf die Einhaltung von Vorfahrt und Vorrang ermöglicht und Hinweise für die Modellierung liefert. Abbildung 67 zeigt exemplarisch die Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für das Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr. Die Auswertungen der anderen betrachteten Intervalle finden sich in Anhang 4.

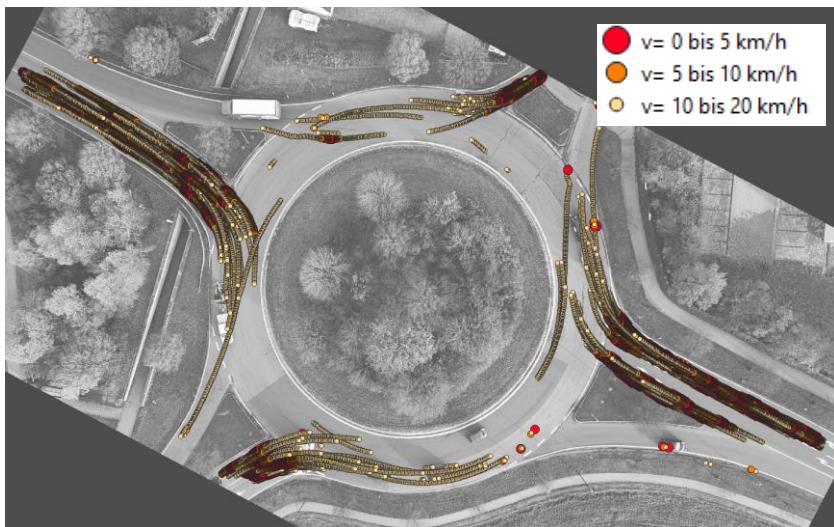


Abbildung 67: Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr

Es ist zum einen zu erkennen, dass erwartungsgemäß vor allem in den Zufahrten reduzierte Geschwindigkeiten und Stopps auftreten. Zum anderen ist zu erkennen, dass es auf der Kreisfahrbahn wenige Bereiche gibt, in denen die Geschwindigkeiten verringert sind oder Fahrzeuge gar zum Halten kommen. Hierbei kein Muster zu erkennen, es handelt sich um einzelne Beobachtungen. Die dargestellten Punkte am Ende der Ausfahrten sind zu vernachlässigen, diese wurden als Artefakte der Trajektorienerstellung identifiziert.

Ggf. würde eine größere Stichprobe Regelmäßigkeiten aufzeigen. Jedoch ist folgendes festzuhalten: Neben verringerten Geschwindigkeiten aufgrund vorrausfahrender Fahrzeuge ist zu beobachten, dass verringerte Geschwindigkeiten insbesondere bei Fahrzeugen auftreten, die vom inneren Fahrstreifen in die Ausfahrt ausfahren wollen, jedoch mit Fahrzeugen auf dem äußeren Fahrstreifen interagieren müssen und diesen Vorrang gewähren. In Einzelfällen wird dieser Vorrang missachtet (vgl. Abbildung 68), was jedoch über das gesamte Intervall betrachtet keine Auswirkungen auf die Kapazität hat.

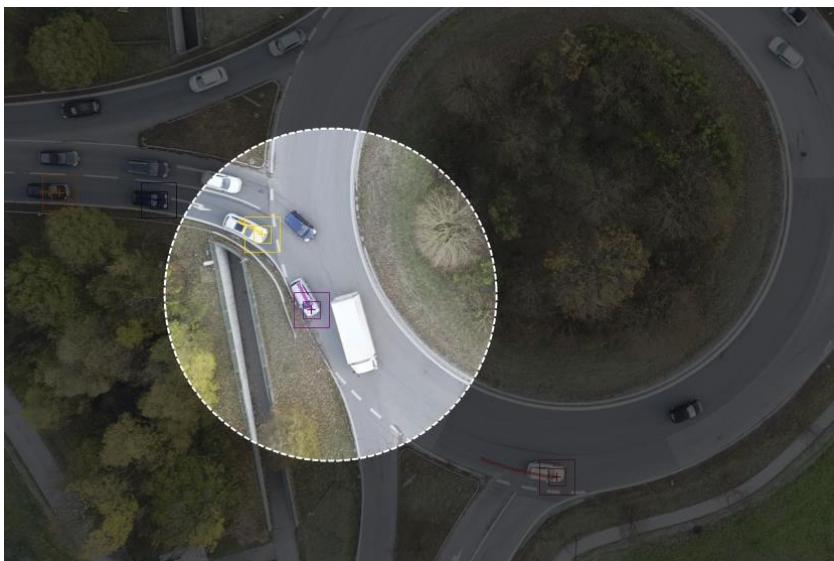


Abbildung 68: Konflikt zwischen einem ausfahrenden Fahrzeug vom inneren Fahrstreifen mit einem (gerade eingefahrenen) Fahrzeug auf dem äußeren Fahrstreifen

## 6.7 Zusammenfassung der Beobachtungen

Die für eine Simulation als relevant erachteten Beobachtungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Fahrzeuge fahren in der Regel fahrstreifentreu, obwohl die Kreisfahrbahn nicht markiert ist.
- Alle Fahrzeuge, die auf den linken Fahrstreifen der Zufahrten ankommen, benutzen auch den inneren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn.
- Es erfolgt vor der Ausfahrt aus der Kreisfahrbahn kein frühzeitiger Fahrstreifenwechsel, die Fahrzeuge fahren direkt an der Ausfahrt aus.

- Fahrzeuge auf dem inneren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn beachten in der Regel den Vorrang von Fahrzeugen auf dem äußeren Fahrstreifen, wodurch es teilweise zu verringerten Geschwindigkeiten kommen kann.
- Fahrzeuge, die auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrten ankommen, benutzen in der Regel den äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn, unabhängig davon, an welcher Ausfahrt der Kreisverkehr später verlassen wird.
- Hiervon sind folgende Ausnahmen zu beobachten:
  - Sattelzüge benutzen (vermutlich aus fahrgeometrischen Gründen) häufig die gesamte Breite der Kreisfahrbahn.
  - Fahrzeuge (insbesondere auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrten) nutzen in Einzelfällen die Möglichkeit, eine Art ‚Ideallinie‘ zu fahren, sofern die Verkehrssituation dies zulässt.
- Wie bereits bei BRILON & GEPPERT [2015c] beobachtet, fahren Fahrzeuge häufig versetzt zu den Fahrzeugen auf dem anderen Fahrstreifen der Kreisfahrbahn (vgl. Abbildung 69).

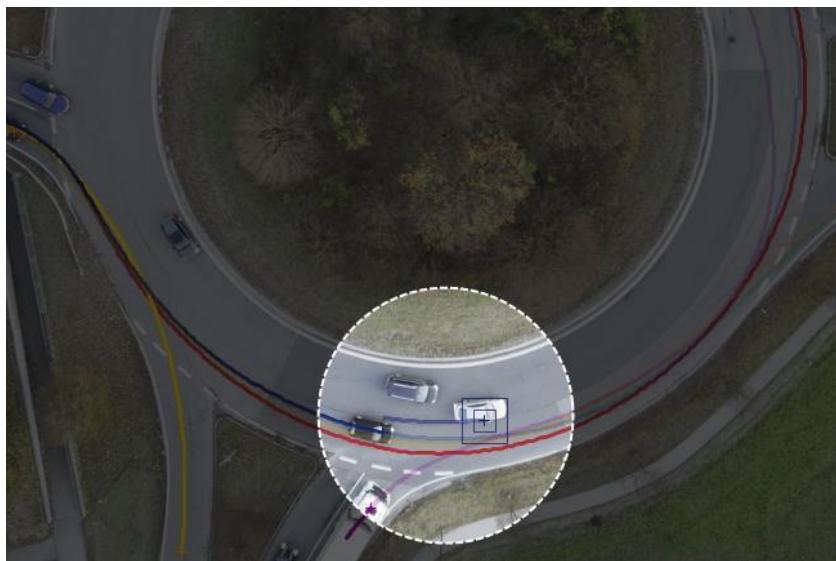


Abbildung 69: Versetztes Fahren auf der Kreisfahrbahn

# 7 Verkehrsmodell

## 7.1 Allgemeines

Die Schritte bei der Durchführung des Simulationsexperiments folgen generell den ‘Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation’ [FGSV, 2006a]. In diesem Kapitel werden die Arbeitsschritte beschrieben und durchgeführt, die dem Simulationsexperiment vorgelagert sind, die Kapitelüberschriften entsprechen der Bezeichnung nach FGSV [2006a]. Das Simulationsexperiment wird im folgenden Kapitel 8 abgehandelt, Abbildung 70 gibt hierüber einen Überblick (blau = Kapitel 7, gelb = Kapitel 8, grün = Kapitel 7 & 8).

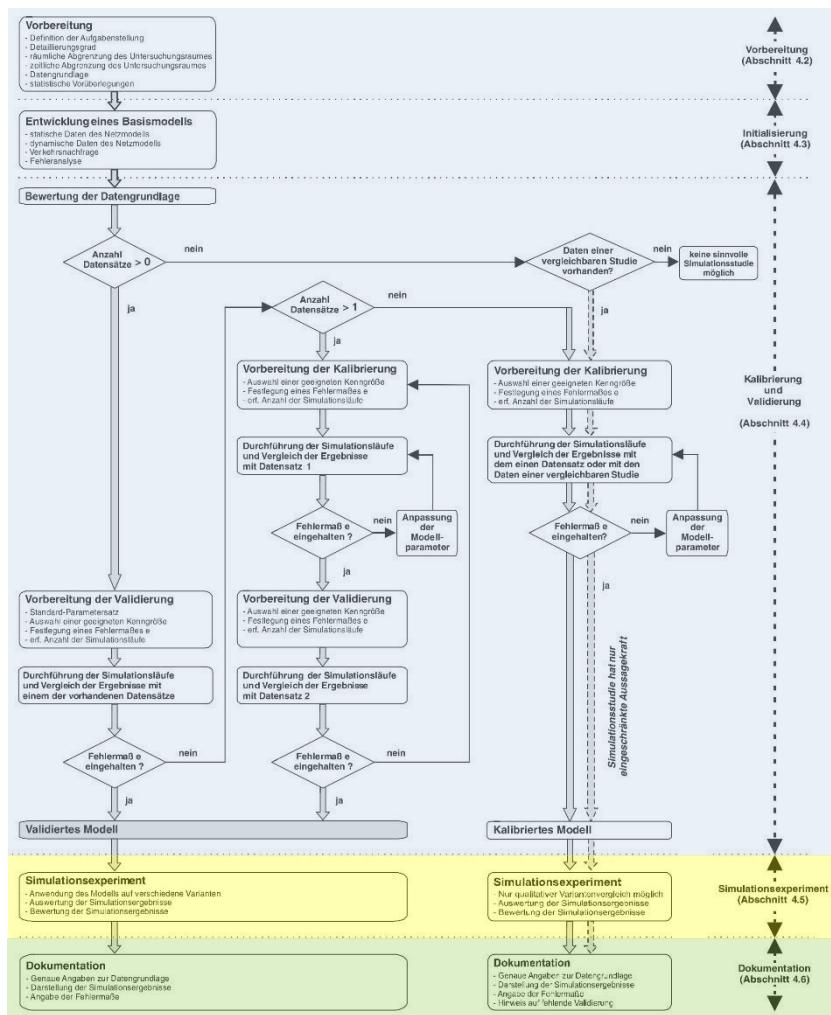


Abbildung 70: Ablaufschema eines Simulationsexperiments, nach [FGSV, 2006a]

## 7.2 Vorbereitung

### 7.2.1 Inhalte des Arbeitsschrittes

In einem ersten Schritt muss die Eignung der gewählten Modellgruppe auf deren Tauglichkeit für die Fragestellung geprüft werden. Zu diesem Zeitpunkt muss auch eine Entscheidung über die gewünschte Aussagegenauigkeit getroffen werden, um später zu statistisch abgesicherten Ergebnissen zu gelangen. Diese wird zu einem späteren Zeitpunkt durch eine ausreichend große Anzahl an Simulationsläufen sichergestellt. Zudem ist festzusetzen, wie das Modell räumlich und zeitlich abgegrenzt wird. Dazu gehören zum einen die statischen Randbedingungen der Verkehrsinfrastruktur, also die Geometrie der Verkehrs-anlage sowie die verkehrsregelnden Maßnahmen wie z. B. die Vorfahrtsrege-lungen. Zum anderen gehören die Daten verkehrstechnischer Einrichtungen dazu. Elementar ist hier auch die Erhebung der Verkehrsnachfrage, die auf der zuvor festgelegten zeitlichen Abgrenzung des Simulationsexperiments basiert und dementsprechend erhoben werden sollte. [FGSV, 2006a]

### 7.2.2 Festsetzungen

Räumlich wird der Knotenpunkt für die vorliegende Fragestellung isoliert be-trachtet. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass die Zufahrtsstrecken der ein-zelnen Knotenpunktarme ausreichend lang gewählt werden, damit alle Fahr-zeuge, die ins Netz eingespeist werden sollen, auch auf eine nicht durch Rückstau blockierte Strecke eingespeist werden können.

Die Simulationsdauer soll analog zu den Intervallen aus der Verkehrsuntersu-chung 5:25 min oder nach erfolgter Kalibrierung 5 min betragen. Damit ist eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Instationarität berücksichtigt, die innerhalb des HBS keine Beachtung findet [VORTISCH et al., 2020]. Zugleich wird hier ein größerer Bereich an Gesamtverkehrsstärken sowie verschiedene Verteilungen dieser auf die einzelnen Fahrbeziehungen betrachtet.

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, ist es notwendig, eine ausreichend große Anzahl an Simulationsläufen durchzuführen.

### 7.2.3 Eingangsdaten

Als Eingangsdaten dienen die ermittelten verkehrlichen Daten aus der Knotenpunktzählung (Verkehrsbelastung, Verkehrsströme) sowie die geometrischen Grunddaten des ‚Pullacher Kreisels‘ (Kapitel 6).

## 7.3 Initialisierung

### 7.3.1 Inhalte des Arbeitsschrittes

*“Das Ziel der Initialisierung ist es, ein nachprüfbares, reproduzierbares und fehlerfreies Modell mit dem für die Aufgabenstellung erforderlichen Genauigkeitsgrad zu erstellen.”* [FGSV, 2006a]

Kern des Arbeitsschrittes ist die Erstellung eines Basismodells, welches einerseits die Verkehrsinfrastruktur (statische Daten wie das Streckennetz, Vorfahrtsregeln etc. aber auch dynamische Daten), andererseits die Verkehrs nachfrage abbildet. Ebenfalls Teil des Arbeitsschrittes ist die Kontrolle des erstellten Basismodells. Die Kontrolle erfolgt in erster Instanz visuell, aber auch Auswertewerkzeuge in ‚PTV Vissim‘ sind hier hilfreich, um grobe Fehler im Modell zu erkennen. Wichtig ist hierbei, Testläufe mit verschiedenen Startzufallszahlen durchzuführen, da diese teils großen Einfluss auf den Ablauf einer Simulation haben und sich damit auch auf deren Ergebnisse auswirken. Zum Beispiel kann es passieren, dass die Simulation mit einer Startzufallszahl plausibel und fehlerfrei abläuft, aber das Modell bei einer anderen Startzufallszahl überstaut. [FGSV, 2006a]

### 7.3.2 Überlegungen zum Aufbau des Basismodells

Zur Abbildung der beiden Fahrweisen ist es notwendig, ein flexibles Modell zu erstellen, welches die Möglichkeit bietet, einzelne Fahrbeziehungen zu unterbinden. Im besten Fall ist dies für beide Fahrweisen dasselbe Modell, in dem z. B. nur die Routenwahl angepasst werden muss, um die jeweilige Fahrweise abzubilden. Hintergrund ist, dass für das Simulationsexperiment ein an der Realität kalibriertes und am besten auch validiertes Modell (vgl. Kapitel 7.4) vorliegen sollte. Gelingt eine Kalibrierung nicht, so muss die gleiche Grundlage vorhanden sein, um zumindest qualitative Aussagen treffen zu können. [FGSV, 2006a]

Für die Modellierung eines zweistreifigen Kreisverkehrs gibt es vielfältige Möglichkeiten, die vor Beginn der Modellierung einer näheren Betrachtung unterzogen werden sollten. Sowohl für die Kreisfahrbahn als auch für die zweistreifigen Zufahrten gibt es mehrere mögliche Lösungen und Kombinationen.

#### Kreisfahrbahn

Für die Modellierung der zweistreifigen Kreisfahrbahn sind prinzipiell drei Möglichkeiten denkbar (vgl. Abbildung 72), die aus verschiedenen Kombinationen von Strecken mit unterschiedlicher Anzahl an Fahrstreifen aufgebaut werden können (vgl. Abbildung 71).

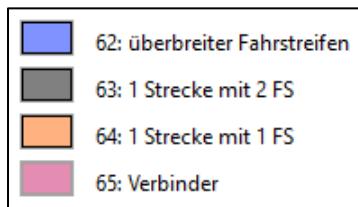


Abbildung 71: Darstellung der verschiedenen Kombinationen von Strecken mit unterschiedlicher Anzahl an Fahrstreifen für die Modellierung

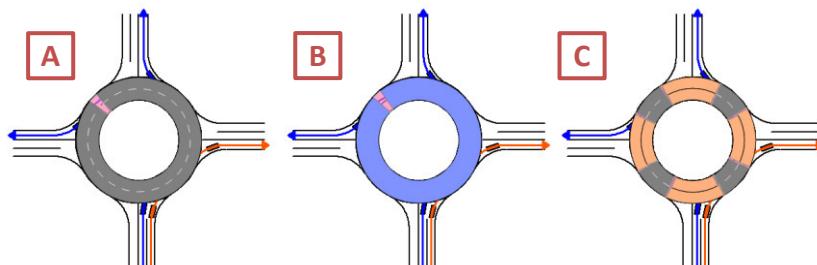


Abbildung 72: Varianten A (links), B (Mitte) und C (rechts) für die Modellierung einer zweistreifigen Kreisfahrbahn

Variante A zeigt die Modellierung der zweistreifigen Kreisfahrbahn als eine Strecke mit zwei Fahrstreifen. Es ist nicht möglich, eine geschlossene Kreisfahrbahn in „PTV Vissim“ zu konstruieren, daher muss an einer Stelle ein Verbinder (Verbindung zweier Streckenelemente) gesetzt werden. Diese muss so gewählt werden, dass die Zufahrten problemlos an die Kreisfahrbahn angeschlossen werden können.

Variante B zeigt die Modellierung als eine Strecke mit einem Fahrstreifen (überbreit). Diese Variante gleicht auf den ersten Blick am ehesten einem unmarkierten zweistreifig befahrbaren Kreisverkehr. Hier ist ebenfalls zu beachten, dass der Verbinder an einer geeigneten Stelle gesetzt wird.

Variante C zeigt die Modellierung mit teils 2-streifigen Abschnitten, die einen Fahrstreifenwechsel erlauben, und teils Abschnitten mit zwei Strecken mit jeweils einem Fahrstreifen. Auf diesen ist kein Wechsel des Fahrstreifens möglich. Es ist davon auszugehen, dass hiermit beide Verkehrsregelungen gut abgebildet werden können, da die in Kapitel 3.2 erläuterte, reduzierte Anzahl an Konfliktpunkten bei Fahrweise 2 durch Wegnahme des äußeren Fahrstreifens pragmatisch erzwungen werden kann. Dagegen ist fraglich, inwiefern sich die sehr kurzen Verflechtungsstrecken auf den Verkehrsfluss auswirken und ob die beobachteten Ausfahrvorgänge vom inneren Fahrstreifen korrekt abgebildet werden können.

## Zweistufige Zufahrten

Auch bei der Modellierung der zweistufigen Zufahrten gibt es mehrere Optionen, wie Abbildung 73 aufzeigt.

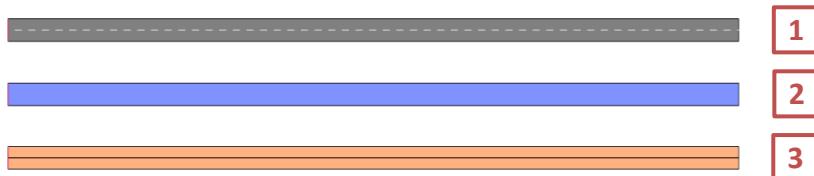


Abbildung 73: Varianten 1 bis 3 (von oben nach unten) für die Modellierung einer zweistufigen Zufahrt

Variante 1 ist dabei als eine Strecke mit zwei Fahrstreifen, Variante 2 als eine Strecke mit einem überbreiten Fahrstreifen und Variante 3 als zwei getrennte Strecken mit jeweils einem Fahrstreifen ausgebildet.

Variante 3 weist hierbei die Besonderheit auf, dass im Zuge des gesamten Zuflufs keine Fahrstreifenwechsel möglich sind. Hier müssen die Fahrzeuge der jeweiligen Verkehrsströme bereits korrekt über den Zufluss der jeweiligen Strecke in das Netz eingespeist werden. Dies kann den Vorteil haben, dass vorher errechnete Verteilungen der Ströme besser abgebildet werden können. Dem könnte jedoch gegenüberstehen, dass eine verkehrsabhängige Fahrstreifenwahl in der Zufahrt nicht mehr durch Entscheidungen der einzelnen modellierten Fahrzeuge abgebildet werden kann. Ein weiterer Vorteil dabei könnte sein, dass das Modell ohne großen Aufwand auf einen Kreisverkehr mit einstreifigen Zufahrten angepasst werden kann, z. B. durch eine Festlegung des Zuflusses auf der linken Strecke von  $q = 0$ .

Generell sind auch Mischformen möglich, um bspw. lediglich im direkten Zufahrtsbereich durch Wahl der Variante 3 jegliche Fahrstreifenwechsel zu unterbinden.

## Fahrverhalten (Querverhalten)

Die Wahl der Ausbildung der Kreisfahrbahn und der Zufahrten ist nicht losgelöst vom Querverhalten der Fahrzeuge zu betrachten. Während diese bei Variante C (kein Fahrstreifenwechsel möglich) einen geringen bis keinen Einfluss hat, so kann eine entsprechende Einstellung und Nutzung des Querverhaltens dazu führen, dass mit den Varianten A und B ggf. realitätsnäher modelliert werden kann. Beim Querverhalten ist zum einen die Fahrstreifenwahl zu beachten (Variante A), zum anderen das Querverhalten innerhalb eines Fahrstreifens (Variante B).

Für alle Varianten wird die Fahrstreifenwahl relevant. Dabei werden für Pkw je Verkehrsregelung zwei verschiedene Fahrverhalten angelegt, mittels derer (in Kombination mit den statischen Routenentscheidungen) festgelegt wird, wie viele Fahrzeuge welche Fahrstreifen zu benutzen haben. Hierzu ist es zudem notwendig, zwei separate Fahrzeugklassen für Pkw anzulegen, eine weitere umfasst den SV.

Diese Randbedingungen gelten generell auch für die Zufahrten. Variante 1 muss zudem so ausgebildet werden, dass die Strecke mit zwei Fahrstreifen kurz vor Erreichen der Kreisfahrbahn in zwei Strecken mit je einem Fahrstreifen übergeht. Dies ist notwendig, weil als Attribut des Fahrverhaltens für die Fahrstreifenwahl lediglich ‚freie Fahrstreifenwahl‘ und ‚Rechtsfahrgebot‘ gewählt werden kann, nicht jedoch ein ‚Linksfahrgebot‘ für eine spezielle Gruppe von Fahrzeugen. Eine Anpassung des Querverhaltens auf ‚Links‘ ist in diesem Fall nicht ausreichend, da sich dieses lediglich auf die Orientierung innerhalb eines Fahrstreifens, nicht aber die Strecke bezieht. So kann die Fahrstreifenwahl über die Definition der Routenwahl beeinflusst bzw. festgelegt werden.

## Fahrzeugzuflüsse

Gemäß den obigen Überlegungen bzgl. der Fahrzeugklassen und der Fahrverhalten und zur Vereinfachung einer späteren Automatisierung des Simulationsexperiments ist es ratsam, je Zufahrt und Fahrstreifen je drei Fahrzeugzuflüsse zu setzen. Vorteil hiervon ist, dass diese einfacher aus einem externen

Programm angesteuert bzw. deren Werte direkt geändert werden können, während die eigentliche Fahrzeugzusammensetzung für jeden Fahrzeugzufluss einmal definiert wird und dann nicht mehr geändert werden muss.

Prinzipiell sind auch hier verschiedene Möglichkeiten zur Einspeisung der Fahrzeuge ins Netz denkbar, die den Varianten der Zufahrten entsprechen und dementsprechend mit Zufahrten und Kreisfahrbahn kombiniert werden. Diese Kombinationen werden im folgenden anhand der alphanumerischen Systematik X.#.# bezeichnet, wobei X.#.# für die Kreisfahrbahn steht, X.#.# für die Zufahrt und X.#.# für die Fahrzeugzuflüsse. Die verschiedenen Varianten lassen sich wie folgt beschreiben (hier am Beispiel der Varianten A.1.1 bis A.1.3):

Variante A.1.1: Die gesamte Zufahrt ist als eine Strecke mit zwei Fahrstreifen modelliert, es werden für jede Fahrzeugklasse je zwei Fahrzeugzuflüsse gesetzt. Die Fahrzeuge werden auf beiden Fahrstreifen frei verteilt eingespeist, unmittelbar im Anschluss ordnen sich die Fahrzeuge auf dem jeweiligen Fahrstreifen ein, was zu mehreren Fahrstreifenwechseln führt, die in der Realität nicht auftreten. Bei einer hohen Verkehrsstärke führt dies ggf. zu Störungen in der Zufahrt.

Variante A.1.2: Am Beginn der Zufahrt wird eine Strecke mit einem Fahrstreifen angelegt, mittels zwei Verbindern wird der dort über einen gemeinsamen Fahrzeugzufluss eingespeiste Verkehrsstrom auf die folgenden zwei Fahrstreifen aufgeteilt.

Variante A.1.3: Am Beginn der Zufahrt werden zwei Strecken mit je einem Fahrstreifen angelegt und mit dem jeweiligen Fahrstreifen der zweistufigen Strecke verbunden (vgl. Abbildung 74). Hierbei werden die verschiedenen Fahrzeugklassen über jeweils einen eigenen Fahrzeugzufluss auf dem bereits korrekten Fahrstreifen eingespeist. Neben dem Wegfallen von Fahrstreifenwechseln innerhalb der Zufahrt oder im Übergang zwischen Zuflussstrecke und Zufahrt bietet diese Variante den Vorteil, dass die statischen Routen einfacher den jeweiligen Fahrzeugklassen zugeordnet werden können.

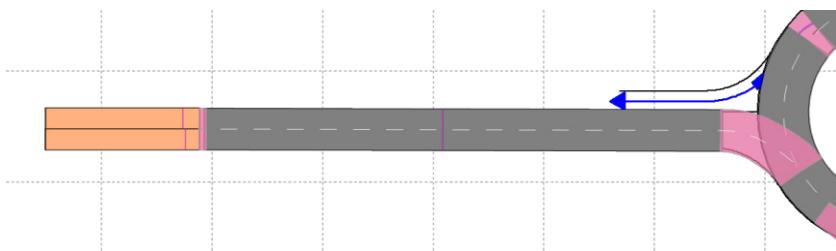


Abbildung 74: Ausschnitt der Variante A.1.3

Für Variante B (Kreisfahrbahn als überbreiter Fahrstreifen) werden die Einstellungen zum Querverhalten innerhalb eines Fahrstreifens relevant. Auch hier müssen verschiedene Fahrverhalten angelegt werden, die den analog zu oben angelegten Fahrzeugklassen zugewiesen werden. Hier wird die Orientierung der Fahrzeuge innerhalb des überbreiten Fahrstreifens der Zufahrt und der Kreisfahrbahn auf ‘links’ oder ‘rechts’ festgelegt.

Auch hier sind verschiedene Varianten denkbar, um Fahrzeuge z. B. mit einem ebenfalls „überbreiten“ Fahrstreifens in der Zufahrt (Abbildung 73, Variante 2), mit denselben Vor- und Nachteilen, einzuspeisen.

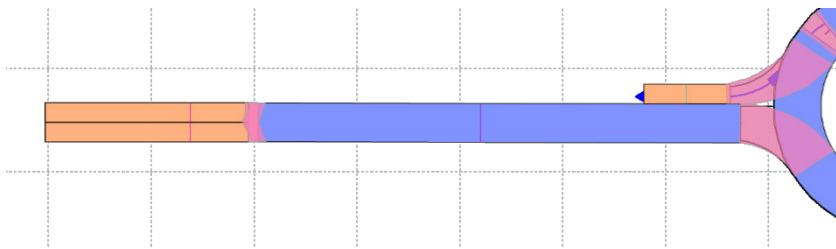
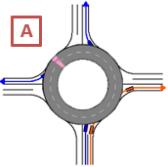
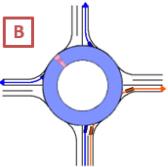
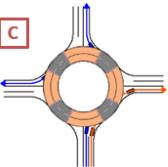


Abbildung 75: Ausschnitt der Variante B.2.3

In Summe ergeben sich damit die in Tabelle 9 aufgelisteten Varianten, von denen die in grün hinterlegten Varianten in einem einfachen Modell einer Voruntersuchung unterzogen werden. Die rot hinterlegten Varianten weisen keinen erkennbaren Mehrwert gegenüber den grün hinterlegten auf, da diese sich lediglich durch die Art der Strecken für die Fahrzeugzuflüsse unterscheiden.

Tabelle 9: Mögliche Modellierungsvarianten (Grün = untersucht, Rot = nicht untersucht, (x) = Modellierung Zufluss entspricht Modellierung Zufahrt)

	1.	2.	3.
	(A.1.1)	A.2.1	A.3.1
	A.1.2	(A.2.2)	A.3.2
	A.1.3	A.2.3	(A.3.3)
	(B.1.1)	B.2.1	B.3.1
	B.1.2	(B.2.2)	B.3.2
	B.1.3	B.2.3	(B.3.3)
	(C.1.1)	C.2.1	C.3.1
	C.1.2	(C.2.2)	C.3.2
	C.1.3	C.2.3	(C.3.3)

Die betrachteten Varianten lassen sich auf Basis der Voruntersuchung wie in Tabelle 10 dargestellt bewerten.

Tabelle 10: Bewertung der verschiedenen Varianten

Variante	Bewertung
A.1.3	FFE wechseln im Vergleich zur Realität zu früh von innen nach außen, Geradeausfahrer bspw. wechseln direkt nach Einfahrt in die Kreisfahrbahn
A.2.3	FFE orientieren sich ausschließlich auf dem äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn → Korrektur ggf. durch Anlage von einstreifigen Zwischenquerschnitten möglich, entspricht dann prinzipiell Variante C.2.3
A.3.3	Vgl. A.1.3
B.1.3	Lediglich marginale Unterschiede erkennbar. Zur Abbildung der real beobachteten Trajektorien bei der Ausfahrt ist die Verlängerung der Verbinder notwendig. FFE vom inneren und äußeren Fahrstreifen fahren fälschlicherweise parallel in die Ausfahrt.
B.2.3	
B.3.3	
C.1.3	FFE bremsen beim Fahrstreifenwechsel von innen nach außen stark ab, durch Einstellungen im Fahrverhalten und Anpassung der Strecken und Verbinder sollte eine Abbildung der realen Trajektorien möglich sein. Kurze Abschnitt mit zwei einstreifigen Strecken sind notwendig, um die Fahrweisen über die Routenentscheidungen abbilden zu können. Hinsichtlich der Zufahrten bietet C.2.3 keinen Mehrwert gegenüber den anderen Varianten.
C.2.3	
C.3.3	

Mit Blick auf die aus der Verkehrsuntersuchung gewonnenen Erkenntnisse erscheint die Variante C.3.3 als die im Ergebnis geeignetste und adaptierbarste. Durch die Anlage von kurzen Abschnitten mit je zwei einstreifigen Strecken auf der Kreisfahrbahn sollten sich die Fahrweisen mittels Routenentscheidungen abbilden lassen. Zudem werden hier für die Ausfahrten jeweils zwei Verbinder notwendig (je Fahrstreifen der Kreisfahrbahn ein Verbinder), wodurch ein paralleles Ausfahren aus der Kreisfahrbahn verhindert wird. Die Anlage von jeweils zwei einstreifigen Strecken in den Zufahrten vermeidet zudem

potenzielle Fahrstreifenwechsel, die in der Verkehrsuntersuchung nicht zu beobachten waren.

### 7.3.3 Methodik der Plausibilitätsprüfung

Um nachvollziehen zu können, wie sich die modellierten Fahrzeuge verhalten, ist es sinnvoll, die Prüfung auf Plausibilität nicht nur anhand der Beobachtung der Bewegung der FFE in der grafischen Oberfläche der laufenden Simulationen nachzuvollziehen, sondern einen Weg zu finden, sowohl die Trajektorien der einzelnen FFE abbilden zu können, als auch mögliche Problemstellen identifizieren zu können. Dies wird durch die Nutzung des in ‚PTV Vissim‘ hinterlegten ‚Fahrzeugprotokolls‘ ermöglicht. Prinzipiell folgt die Methodik der in Kapitel 6.5 beschriebenen Methodik für die Erstellung der Trajektorien mittels ‚Kinovea‘ und Übertragung in ‚QGIS‘. Elementar wichtig ist dabei die in ‚PTV Vissim‘ und ‚Kinovea‘ erzeugten Punkte bzw. deren Koordinaten in ein einheitliches Koordinatensystem zu transferieren. Für die Bearbeitung und Auswertung hat es sich als praktikabel erwiesen, den Nullpunkt des Koordinatensystems in den Mittelpunkt des Kreisverkehrs zu legen. Den schematischen Ablauf der Methodik zeigt das Ablaufdiagramm in Abbildung 76.

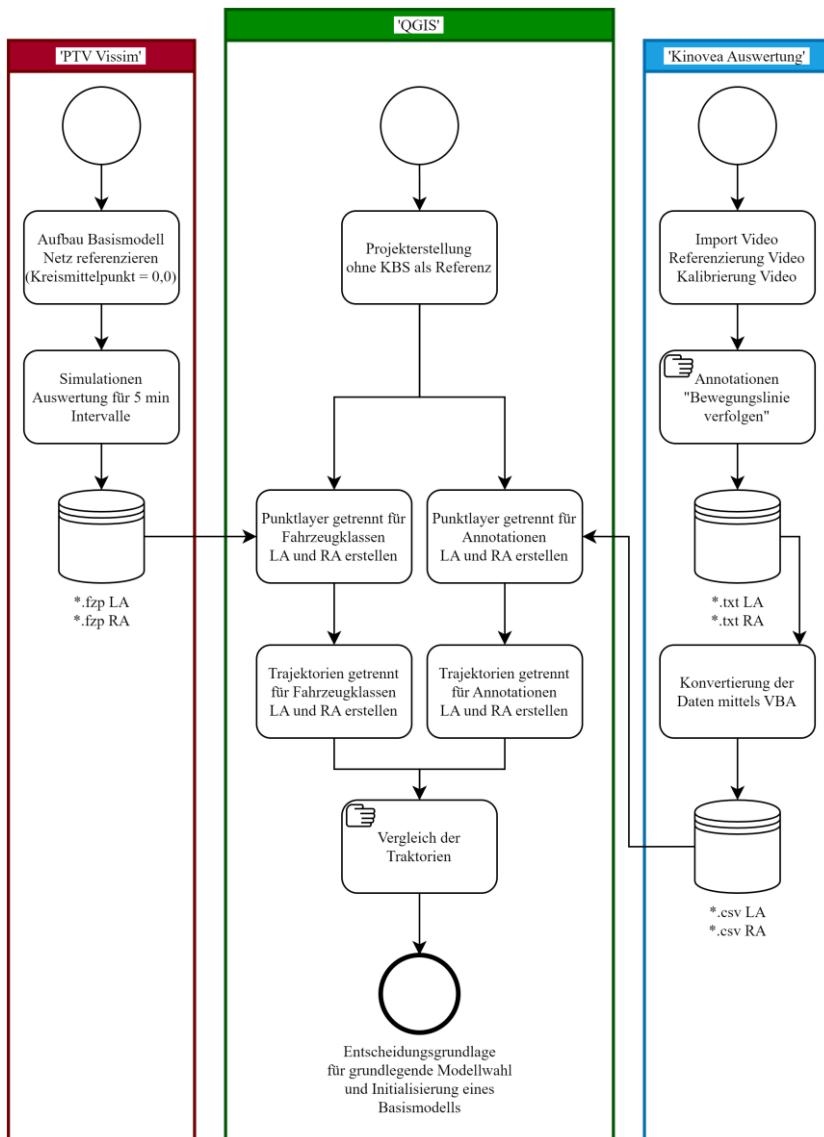


Abbildung 76: Ablaufdiagramm zur Plausibilitätsprüfung des Basismodells mittels eines Vergleichs der erzeugten Trajektorien aus 'PTV Vissim' und 'Kinovea' in 'QGIS'

### 7.3.4 Auswertungen aus Vissim

,PTV Vissim‘ arbeitet mit Netzkoordinaten, die nicht georeferenziert sind. Zwar lässt sich das modellierte Netz mittels der Hintergrundkarte einer Georeferenz zuordnen, die Ausgabe der Koordinaten im Fahrzeugprotokoll erfolgt jedoch anhand der Netzkoordinaten. Der Nullpunkt bzw. Referenzpunkt der Netzkoordinaten wird anhand des Anfangspunktes des ersten erzeugten Elements gesetzt. Dieser muss manuell in den Mittelpunkt des Kreisverkehrs gesetzt werden. Abbildung 77 zeigt beispielhaft die Koordinaten des manuell gesetzten Referenzpunktes in der Hintergrundkarte und im Netz.

Hintergrundkarten	
Referenzpunkt in Hintergrundkarte:	(1336066.305, 6075166.867)
Referenzpunkt im Netz:	(-22.600, 20.000)

Abbildung 77: Lage des Referenzpunktes in der Hintergrundkarte und im Netz

Die Ausgabe der Parameterwerte der einzelnen FFE erfolgt durch das ‚Fahrzeugprotokoll‘. Während verschiedene Werte, wie bspw. die Nummer der FFE, die momentane Geschwindigkeit oder der Zeitstempel voreingestellt ausgegeben werden, müssen die x- und y-Koordinaten manuell hinzugefügt werden. Analog zur Erstellung in ‚Kinovea‘ fällt die Wahl auf die Koordinaten der Fahrzeugfront. Prinzipiell lassen sich so eine Vielzahl weiterer Parameter ausgeben, die in Rahmen dieser Arbeit jedoch keine Relevanz besitzen.

Die Ausgabe erfolgt als \*.fzg-Datei, die im Grunde einer simplen Textdatei entspricht, vgl. Abbildung 78. Ausgegeben werden Einzelpunkte der Trajektorien, nicht die Trajektorien an sich.

```
$VEHICLE;SIMSEC;NO;LANE\LINK;NO;LANE\INDEX;POS;POSLAT;COORDFRONTX;COORDFRONTY;INTERACTSTATE;SPEED;SPEEDTHEOR
900.10;1240;28;1;90.52;0.31;460.045;-330.035;Brake BX;27.98;56.59
900.10;1289;28;1;74.39;0.30;463.930;-346.731;Brake BX;28.62;45.50
900.10;1296;30;1;21.16;0.27;496.375;-345.709;Free;34.32;40.96
900.10;1297;10036;1;15.03;0.31;449.524;-364.413;Free;27.58;28.82
```

Abbildung 78: Ausschnitt aus einer \*.fzg-Datei

Es hat sich als sinnvoll erwiesen, die Ausgabe nach den definierten Fahrzeugklassen zu filtern, um diese später in getrennten Layern in ‚QGIS‘ darstellen zu können. Hierzu müssen die Simulationen mit den gleichen Startzufallszahlen zweimal durchgeführt werden.

### 7.3.5 Erzeugung und Vergleich der Trajektorien in QGIS

Um die in ‚PTV Vissim‘ und ‚Kinovea‘ erzeugten Punkte vergleichen zu können, werden diese in ein gemeinsames Koordinatensystem in ‚QGIS‘ überführt (vgl. Abbildung 76). Beim Anlegen eines Projektes ist darauf zu achten, dass diesem kein Koordinatenbezugssystem, also ein lokales, nicht georeferenziertes Koordinatensystem zugeordnet wird. Optional kann ein Hintergrundbild des Kreisverkehrs eingefügt, skaliert und händisch referenziert werden.

Eine Vergleichbarkeit der Trajektorien ist hierbei jedoch nicht 1:1 gegeben, was bei der Interpretation der beiden Datenquellen beachtet werden muss. Dies hat verschiedene Gründe:

- In ‚PTV Vissim‘ sind die x- und y-Koordinaten der Fahrzeugfronten exakt definiert und immer am gleichen Punkt der FFE. Demgegenüber ist das Tracking der Fahrzeugfront in ‚Kinovea‘ weniger exakt und kann schwanken.
- Bei der Auswertung in ‚Kinovea‘ ist zu berücksichtigen, dass die Perspektive einen Einfluss haben kann. Wie in Abbildung 79 zu erkennen ist, werden die der Kreisinsel zugewandten Fahrzeugseiten in den Videos sichtbar. Das heißt, tendenziell verlaufen die Trajektorien aus ‚Kinovea‘ weiter außen als die Fahrzeuge in der Realität fahren. Der Einfluss wird jedoch als tendenziell vernachlässigbar eingestuft.

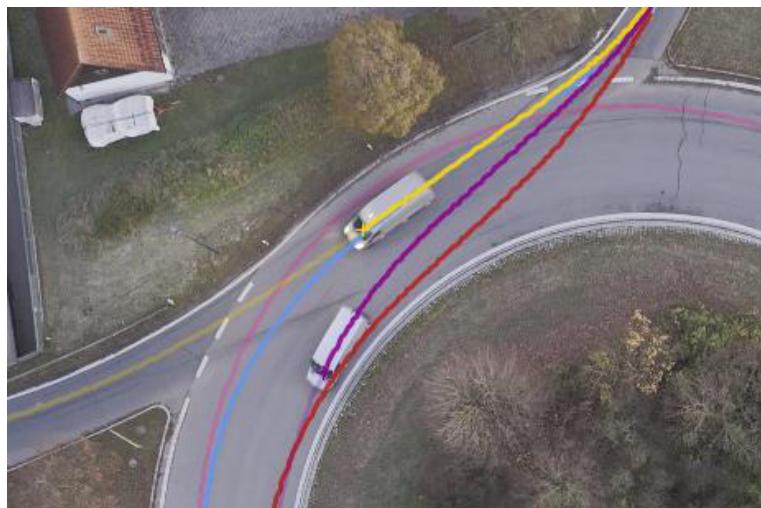


Abbildung 79: Potenzieller Einfluss der Perspektive bei der Auswertung der Trajektorien in „Kinovea“

- In ‘PTV Vissim’ weisen die Fahrzeuge ein sehr homogenes Querverhalten innerhalb des Fahrstreifens auf. Der einzige Einfluss auf das Querverhalten ist der Parameter ‚Wunschposition bei freier Fahrt‘. Wird dieser nicht auf den Wert ‚Beliebig‘ eingestellt, fahren die FFE wie auf einer Schnur aufgereiht, innerhalb des eigenen Fahrstreifens. In der Realität bewegen sich die Fahrzeuge jedoch viel inhomogener, auch fahrstreifenunabhängig.

Das Prozedere beim Import der in den beiden Softwares ausgegebenen Daten in ‚QGIS‘ ist quasi identisch und unterscheidet sich lediglich bei der Zuordnung der Spalten für die x- und y-Koordinaten. Der Import erfolgt in einen Punktlayer über den Befehl ‚Getrennte Textdatei als Layer hinzufügen‘. Allein über die eingelesenen Punkte sind durch die in hoher zeitlicher Dichte erfassten Punkte (ein Punkt je Frame bzw. Zeitschritt) die Trajektorien bereits gut zu erkennen (vgl. Abbildung 80 und Abbildung 81).

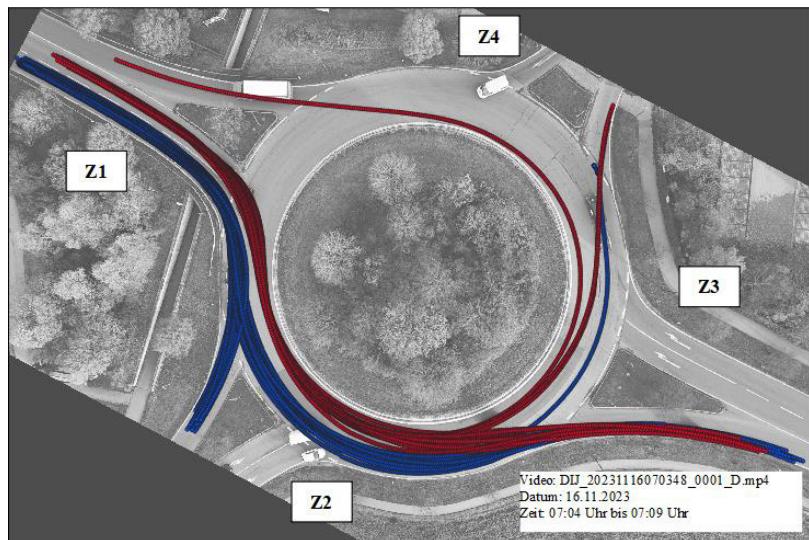


Abbildung 80: Beispielhafte Darstellung der Trajektorien der durch die in „QGIS“ eingelesenen Punkte aus „Kinovea“ für Zufahrt 1, getrennt nach Fahrstreifen der Zufahrt

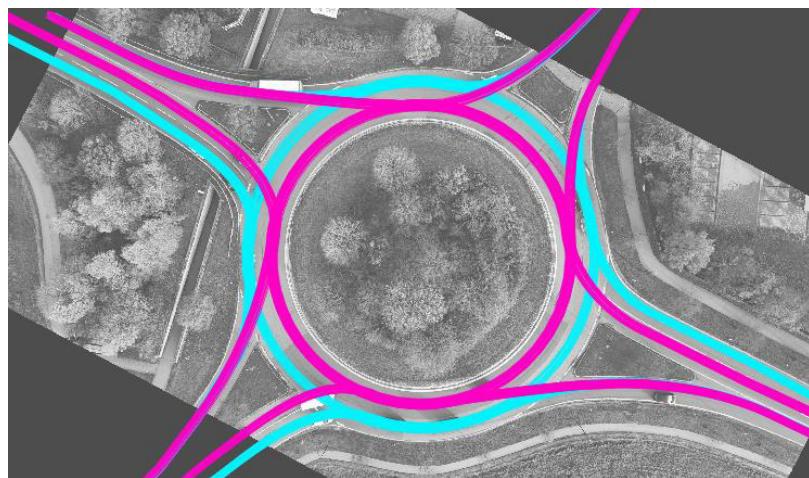


Abbildung 81: Beispielhafte Darstellung der Trajektorien durch die in „QGIS“ eingelesenen Punkte aus „PTV Vissim“, getrennt nach Fahrzeugklassen

Analog zu der in Kapitel 6.6.3 erläuterten Methodik lassen sich auch bei den Daten aus „PTV Vissim“ Bereiche identifizieren, in denen die Geschwindigkeiten verringert sind. Durch die in den Punkten hinterlegten Zeitstempel (Simulationssekunde) können Bereiche, in denen anhand dieser Methodik keine Rückschlüsse auf die Ursache gezogen werden können, nochmals in der Simulation zeitlich isoliert visuell beurteilt werden (gemäß deterministischem Ansatz: gleiche Eingangsparameter und Startzufallszahl ergibt gleichen Simulationsablauf).

Neben der Verortung von Bereichen bzw. Punkten, in denen die Geschwindigkeit verringert ist, sind zudem folgende weitere Informationen durch diese Methodik zu ermitteln:

- Durch die regelbasierte Formatierung der Punkte lassen sich sowohl die in den Fahrzeugzusammensetzungen hinterlegten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen ( $v_{Wunsch}$ ) als auch die Wirksamkeit von Langsamfahrbereichen validieren.
- Die Fahrzeugprotokolldatei kann nach Fahrzeugklassen gefiltert werden, sodass die oben genannte Plausibilisierung des Modells getrennt für die verschiedenen Fahrzeugklassen (LA, RA) durchgeführt werden kann.

Es ist sinnvoll, dass im Rahmen der Plausibilitätsprüfung verschiedene Verkehrsstärken in den Zufahrten, und damit Gesamtverkehrsstärken, betrachtet werden.

### 7.3.6 Erstellung und Prüfung des Basismodells

Die vorhandene Geometrie des „Pullacher Kreisel“ wird in einem ersten Schritt mit den Streckenelementen analog zu der Kombination C.3.3 (vgl. Kapitel 7.3.2) nachgebildet (vgl. Abbildung 82). Auf der Kreisfahrbahn wird die zweistufige Kreisfahrbahn durch kurze Abschnitte mit jeweils zwei einstufigen Strecken unterbrochen. Dies dient, wie bereits oben beschrieben, dazu, die Fahrweisen nachbilden zu können. Im Rahmen der Verkehrsuntersuchung

hat sich gezeigt, dass Fahrzeuge vom inneren Fahrstreifen direkt ausfahren. Dieses Ausfahren erfolgt nahezu tangential bzw. in Form einer Wendelinie. Dies wird entsprechend durch Verbinder modelliert (vgl. Abbildung 83).

Das den Strecken zugeordnete Fahrverhalten und die entsprechenden Parameter werden in diesem Schritt nicht angepasst, sondern verbleiben auf den in „PTV Vissim“ hinterlegten Voreinstellungen. Je Zufahrt werden drei Fahrzeugzuflüsse (ein Fahrzeugzufluss je Fahrzeugklasse) gesetzt, um eine Automatisierung zu vereinfachen. Die Wunschgeschwindigkeit der eingespeisten FFE in den Zufahrten wird vorerst auf die Standardwunschgeschwindigkeitsverteilung von 50 km/h festgelegt.



Abbildung 82: „PTV Vissim“ Basismodell (nur Streckenelemente)

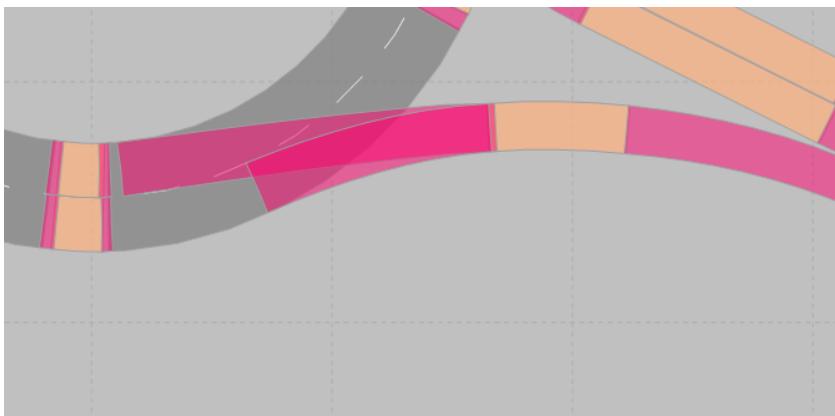


Abbildung 83: Detail der Modellierung einer Ausfahrt in ‚PTV Vissim‘

Die Konfliktflächen (Erläuterung siehe PTV Group [2024]) werden zum einen gemäß den geltenden Vorfahrtsregelungen und zum anderen gemäß den Beobachtungen aus der Verkehrsuntersuchung angelegt (vgl. Abbildung 84). Diese haben gezeigt, dass den Fahrzeugen auf dem äußeren Fahrstreifen in der Regel der Vorrang gewährt wird. Dies bedeutet einerseits Vorfahrt für die Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn gegenüber den Fahrzeugen der Zufahrten, andererseits Vorrang der außen fahrenden Fahrzeuge gegenüber den abbiegenden Fahrzeugen des inneren Fahrstreifens.

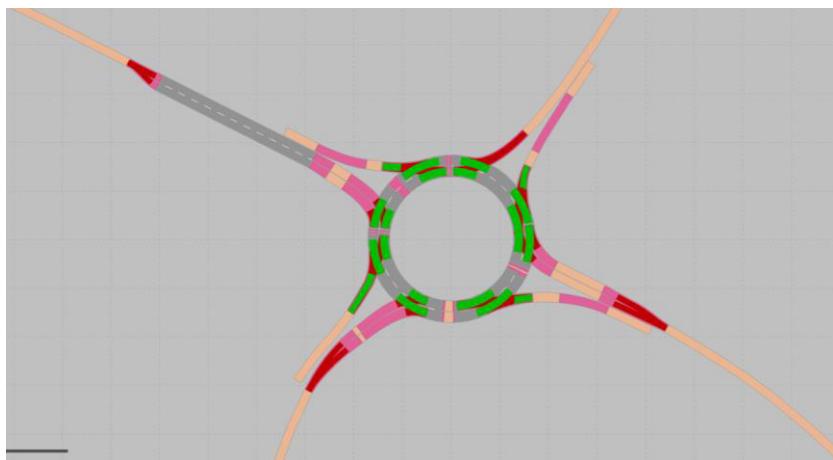


Abbildung 84: „PTV Vissim“ Basismodell (Streckenelemente + Konfliktflächen)

Erwiesenermaßen sind die gefahrenen Geschwindigkeiten innerhalb der Kreisfahrbahn geringer als auf der freien Strecke (z. B. [FGSV, 2006b]), weshalb auf der kompletten Kreisfahrbahn sowie auch in den direkt anliegenden Strecken der Zufahrten Langsamfahrbereiche modelliert werden (vgl. Abbildung 85). Hierfür wird eine eigene Wunschgeschwindigkeitsverteilung ( $v_{Wunsch}$ ) angelegt, die im Schritt der Validierung und Kalibrierung angepasst werden kann. Zur Prüfung der Plausibilität des Basismodells wird diese für die Kreisfahrbahn mit den Werten 20 km/h als Untergrenze und 40 km/h als Obergrenze belegt.

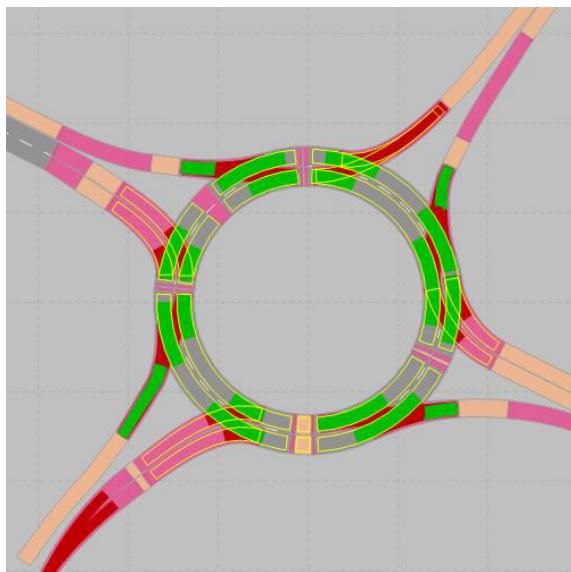


Abbildung 85: Ausschnitt „PTV Vissim“ Basismodell (Streckenelemente + Konfliktflächen + Langsamfahrbereiche)

Die oben beschriebene Anordnung der Streckenelemente ermöglicht die Abbildung der verschiedenen Fahrweisen in Verbindung mit der Anlage der statischen Routenentscheidungen. Für jede Zufahrt werden drei Routenentscheidungen angelegt, die jeweils nur für einzelne Fahrzeugklassen gelten („Pkw RA“, „Pkw LA“ und „Lkw“). Für jede Routenentscheidung werden die erforderlichen Zielquerschnitte in den jeweiligen Ausfahrten gesetzt (vgl. Abbildung 86 und Abbildung 87), alle anderen Fahrbeziehungen sind für die jeweilige Fahrzeugklasse unterbunden.

In der Verkehrsuntersuchung ist zu beobachten, dass ein geringer Anteil von Fahrzeugen auf den rechten Fahrstreifen der zweistufigen Zufahrten den Linksabbiegeströmen zuzuordnen ist, weshalb für die Fahrzeugklasse „Pkw RA“ Zielquerschnitte in allen Ausfahrten (außer für Wender) angelegt werden (vgl. Abbildung 86). Die Routenentscheidungen für FFE der Fahrzeugklasse „Lkw“ entsprechen denen der Fahrzeugklasse „Pkw RA“.

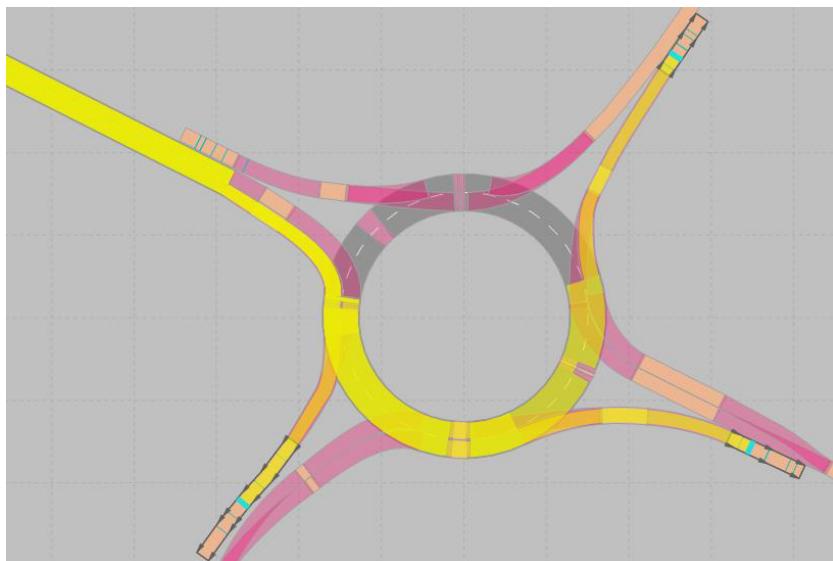


Abbildung 86: Routenentscheidungen (in Gelb dargestellt) für Fahrzeugklasse ‚Pkw RA‘ und ‚Lkw‘

Fahrzeuge auf den linken Fahrstreifen der zweistreifigen Zufahrten sind ausschließlich den Geradeaus- und Rechtsabbiegeströmen zuzuordnen, weshalb für die Routenentscheidungen der Fahrzeugklasse ‚Pkw LA‘ lediglich Zielquerschnitte in der jeweils gegenüberliegenden und linken Ausfahrt angelegt werden (vgl. Abbildung 87).



Abbildung 87: Routenentscheidungen (in Gelb dargestellt) für Fahrzeugklasse ‚Pkw LA‘

Die Verteilung der Fahrzeuge aus Zufahrt Z4 benötigt dabei eine nähere Beobachtung, da diese im Zuge der Auswertungen mit ‚Kinovea‘ nicht getrennt nach RA und LA ermittelt werden können. Dies erfolgt im Nachgang manuell in ‚QGIS‘. Hier von ausgenommen sind die direkten Rechtsabbieger (q12), diese werden alle dem Fahrzeugtyp ‚Pkw RA‘ zugeordnet. Die Verkehrsströme q10 und q11 werden auf Höhe der Zufahrt Z1 gezählt.

Zur Fehlerprüfung wird jeder der Fahrzeugzuflüsse nacheinander mit einer geringen Verkehrsstärke von 150 Fz/h belegt. Dadurch ist es möglich, einzelne FFE optisch zu verfolgen und zu überprüfen, ob bspw. die Routen entsprechend befolgt werden oder sonstige Fehler vorliegen. [FGSV, 2006a] Zur Überprüfung der Vorfahrtsregeln werden im nächsten Schritt alle Fahrzeugzuflüsse mit 200 Fz/h (Pkw) respektive 20 Fz/h (Lkw) belegt.

Nach FGSV [2006a] sollte in einem letzten Schritt eine Überprüfung für verschiedene Verkehrsbelastungen erfolgen, von rund 50 % bis zu 100 % der

beobachteten Werte aus der Verkehrsuntersuchung. Hier werden im Spitzentervall umgerechnet rund 3.360 Fz/h ermittelt.

Bei der Erhöhung der Verkehrsbelastung zeigt sich schnell, dass sich mit den eingestellten Parametern eine komplette Blockade des Kreisverkehrs ergibt. Grund hierfür ist das zögerliche Ausfahren der FFE vom inneren Fahrstreifen in die Ausfahrt, welches nach und nach dazu führt, dass keine FFE mehr ein- und ausfahren können. Ursachen für dieses zögerliche Ausfahren können sich in den Parametern der Konfliktflächen, des Fahrverhaltens oder auch der Verbindler finden. Nach SUKKENIK [2024] können des Weiteren die Geschwindigkeiten eine große Rolle dabei spielen. Dies betrifft sowohl die Höhe der gefahrenen Geschwindigkeiten als auch die Geschwindigkeitsunterschiede der FFE.

Um den beschriebenen Effekt zu vermeiden und um ein lauffähiges Basismodell zu erhalten, werden folgende Schritte im Sinne einer Vor-Validierung durchgeführt.

Im ersten Schritt wird versucht, das zögerliche Verhalten der ausfahrenden FFE durch eine systematische Anpassung der Attribute der Konfliktflächen im Zuge der Ausfahrten zu beeinflussen. Die Variation der Attribute ‚Status der Konfliktflächen‘, ‚Lücke vorn‘ sowie ‚Lücke hinten‘, ‚Faktor Sicherheitsabstand‘ und ‚Sichtbarkeit‘ zeigen jedoch nicht den gewünschten Effekt. Als zielführend erweist sich hingegen die Abbildung des Vorranges über Querverkehrsstörungen anstatt über Konfliktflächen. Die Konfliktflächen im Bereich der Zufahrten werden dabei beibehalten (vgl. Abbildung 88). Der Parameter ‚Mindestzeitlücke‘ für die Querverkehrsstörungen wird in diesem Zuge auf 2,0 angepasst, da dies das Verhalten der Fahrzeuge in der Realität deutlich besser abbildet.

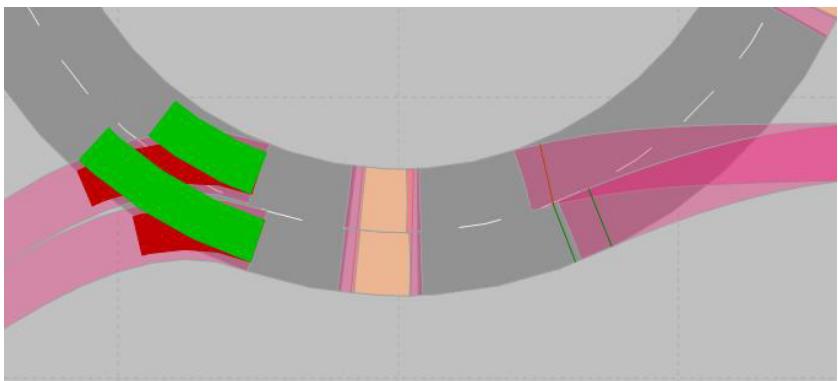


Abbildung 88: Abbildung der Vorfahrtsregelungen über Konfliktflächen (am Beispiel Z2) und Querverkehrsstörungen (am Beispiel A3)

In einem zweiten Schritt werden die Parameter der *vWunsch* für die Langsamfahrbereiche auf der Kreisfahrbahn angepasst. Als Untergrenze wird eine Geschwindigkeit von 30 km/h gewählt, als Obergrenze eine Geschwindigkeit von 35 km/h. Die Auswertungen der Verkehrsuntersuchung zeigt, dass sich in diesem Bereich rund 50 % aller Fahrzeuge bewegen.

Zuletzt werden die Konfliktflächen in den Zufahrten angepasst, da sich insbesondere in Z4 noch ein zu langer Rückstau bildete, der auch auf dem 400 m langen Streckenabschnitt im Zulauf nicht vollständig abgewickelt werden kann. Eine Anpassung der Parameter ‚Lücke vorne‘ und ‚Lücke hinten‘ auf den Wert 0,2 und eine Reduzierung des ‚Faktor Sicherheitsabstand‘ auf den Wert 1,0 zeigten hierbei die gewünschten Auswirkungen.

## 7.4 Kalibrierung und Validierung

### 7.4.1 Inhalte der Arbeitsschritte

Elementar für die quantitative Aussagekraft eines Simulationsexperiments ist die Kalibrierung und Validierung des initialisierten Modells. Beide Vorgänge

sind, wie aus Abbildung 89 ersichtlich, eng miteinander verbunden und folgen prinzipiell dem gleichen Grundprinzip: Die veränderlichen Parameter des Simulationsmodells werden so lange verändert, bis das Modell mit einem Datensatz aus der Erhebung möglichst gut die realen Verkehrsabläufe widerspiegelt (Kalibrierung) und diese im Idealfall mit einem (zweiten) Datensatz bestätigt werden (Validierung). Die Validierung soll also zeigen, wie gut das Modell „... auf andere Gegebenheiten übertragen werden kann bzw. wie gut seine Generalisierungseigenschaften sind“ [FGSV, 2006a].

Schlägt die eingangs durchgeführte Validierung fehl, erfolgt die Kalibrierung iterativ, bis das Modell möglichst gut die Realität abbildet. Daraufhin erfolgt eine abschließende Validierung anhand eines weiteren Datensatzes. Scheitert diese, so können lediglich qualitative Aussagen getroffen werden. [FGSV, 2006a]

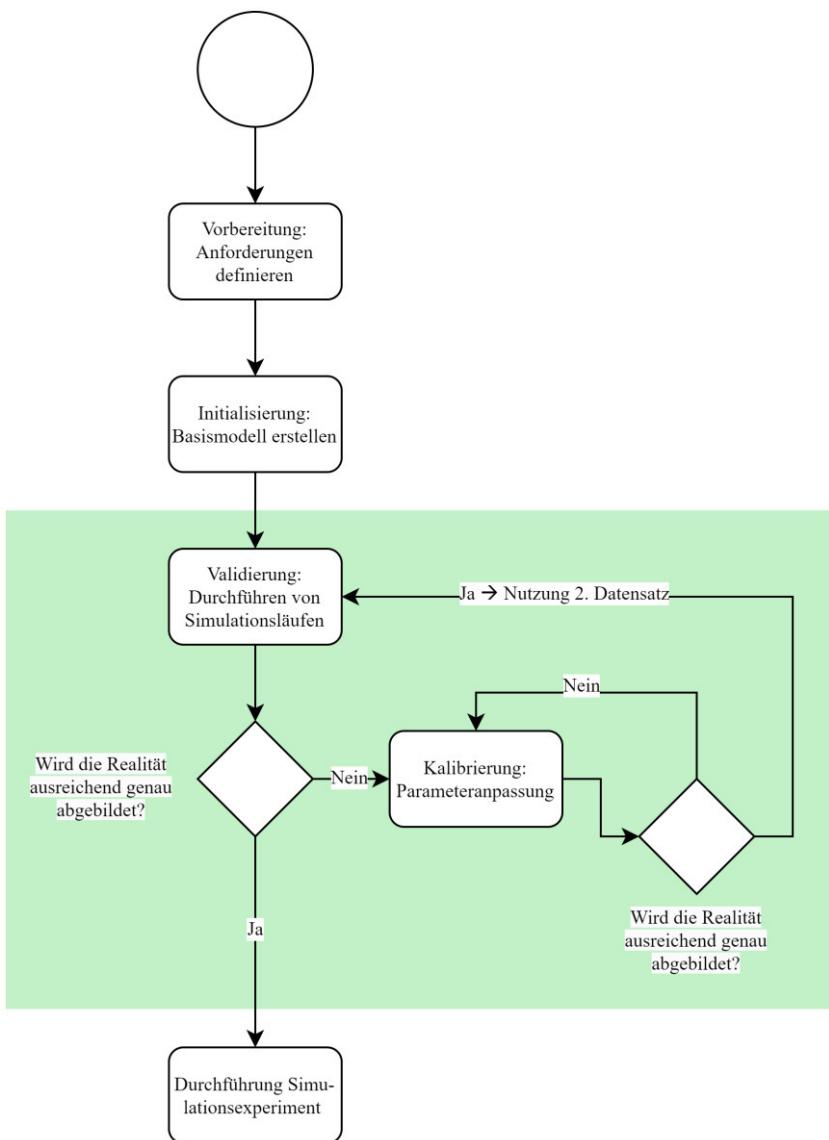


Abbildung 89: Vereinfachtes Ablaufschema Simulationsexperiment bei Vorhandensein mehrerer Datensätze in Anlehnung an [FGSV, 2006a]

### 7.4.2 Allgemeines

Aus der Verkehrsuntersuchung liegen insgesamt drei vergleichbare Datensätze vor. In diesem Fall kann das Modell anhand eines Datensatzes kalibriert werden und anhand eines oder mehrerer weiterer Datensätze validiert werden, sofern die erforderlichen Kenngrößen hierfür vorliegen oder ermittelt werden können. Zur Kalibrierung dient der Zeitraum zwischen 07:28:14 Uhr und 07:33:39 Uhr (Intervall 6, DJI\_20231116072814\_0006\_D). Zur Validierung wird der Zeitraum zwischen 07:33:40 Uhr und 07:39:05 Uhr (Intervall 7, DJI\_20231116073340\_0007\_D) verwendet, der eine rund 6 % höhere Verkehrsbelastung aufweist.

Sowohl die Kalibrierung als auch die Validierung erfolgt anhand der möglichen Kenngrößen für den Verkehrsablauf an einem plangleichen Knotenpunkt gemäß Tabelle 11. Idealerweise wird die Verkehrsuntersuchung so ausgelegt, dass die erforderlichen Kenngrößen direkt gemessen oder im Nachgang (einfach) ermittelt werden können. Die bereits mittels ‚Kinovea‘ erzeugten Trajektorien und die darauf basierende Ermittlung der Verkehrsstärken je Verkehrsstrom sowie der Momentangeschwindigkeit jedes Fahrzeuges für jeden Frame sind für die Kalibrierung und Validierung hingegen nur indirekt von Nutzen. Während Erstes elementar für die Eingabe der Fahrzeugzuflüsse ist, ist Zweitens zwar ein Kalibrierungsparameter zur Beeinflussung des Verhaltens der FFE in der Simulation, jedoch in diesem Kontext keine Kenngröße, anhand der das Modell kalibriert werden kann. Grund hierfür ist zum einen, dass die Geschwindigkeiten stark durch andere Fahrzeuge beeinflusst werden können und kein einheitlicher Verkehrsfluss wie zum Beispiel auf der freien Strecke zu stande kommt. Zum anderen ist es nahezu unmöglich, Bereiche zu definieren, in denen einheitliche Geschwindigkeiten gefahren werden (vgl. Kapitel 6.6.3).

Tabelle 11: Typische Fragestellungen und mögliche Kenngrößen zur Validierung [FGSV, 2006a]

Fragestellung	Mögliche Validierungskenngröße
Einfahrverhalten	Zeitlückenverteilung akzeptierte Zeitlücken Fahrstreifenaufteilung Ort und Anzahl der Fahrstreifenwechsel
Routensuche und Umlegung	Querschnittsbelastung Rückstaulänge Befolgsraten Abbiegeraten Reisezeit
Kapazität einer Hauptfahrbahn	Verkehrsstärke Geschwindigkeit
Verkehrsablauf an einem plangleichen Knotenpunkt	Zeitbedarfswert Rückstaulänge Reisezeit Verlustzeit Grenzzeitlücken
Fahrerverhalten entlang eines Korridores	Geschwindigkeitsprofile Anzahl der Halte
Kapazität einer Abfertigungsanlage	Aufenthaltszeit Rückstaulänge

Die in Tabelle 11 aufgelisteten möglichen Kenngrößen für den Verkehrsablauf an einem plangleichen Knotenpunkt sind hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeit für die vorliegende Arbeit wie folgt einzuordnen:

- **Zeitbedarfswert:** Dieser wird lediglich für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage relevant und scheidet als mögliche Kenngröße aus.
- **Rückstaulängen:** Die Rückstaulängen sind nur in begrenztem Rahmen beurteilbar. Aus der Verkehrsuntersuchung lässt sich lediglich die Erkenntnis gewinnen, dass die Rückstaulängen auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrten Z1 und Z3 selten länger als 40 m sind (Grenzen des Videobildes). Auf den linken Fahrstreifen der beiden Zufahrten hingegen sind die Rückstaulängen messbar, da dieser nie länger als der Bildausschnitt wird. Für die Zufahrten Z2 und Z4 lassen sich hingegen anhand der Beobachtungen keine Aussagen über die entsprechenden Rückstaulängen treffen.

- **Reisezeit:** Nach FGSV [2020a] wird die Reisezeit als „*Zeitbedarf für die Durchführung einer Reise*“ definiert. Reisezeitmessungen sind in „PTV Vissim“ über die Definition eines Start- und Zielquerschnittes einfach auszuwerten. Ebenso können diese aus der Verkehrsuntersuchung bestimmt werden, jedoch nur im begrenzten Ausschnitt des Videobildes. TREIBER & KESTING [2010] definieren die Reisezeit als „... *die Zeitspanne, die ein Fahrzeug für die Durchfahrt eines Streckenabschnitts ... benötigt*“. Aus diesem Kontext wird ersichtlich, dass diese Kenngröße in erster Linie für die Betrachtung längerer Streckenzüge geeignet ist, jedoch prinzipiell nichts gegen die Anwendung auf kurzen Distanzen spricht. Für einen Vergleich ist es notwendig, dass die entsprechenden Messquerschnitte kongruent angelegt und separat für einzelne Verkehrsströme festgelegt werden.
- **Verlustzeiten:** Diese sind definiert als die „... *Differenz zwischen der Fahrzeit, die zum Durchfahren der Strecke zwischen einem Querschnitt vor und einem Querschnitt hinter dem Knotenpunkt, an denen keine Beeinflussung durch den Knotenpunkt festzustellen ist, tatsächlich benötigt wird und einer fiktiven Fahrzeit, die für dieselbe Strecke unter Beibehaltung der Anfangsgeschwindigkeit (theoretisch) anzusetzen wäre*“ [BRILON et al., 1994]. Verlustzeiten entstehen bei der Durchfahrt durch einen Knotenpunkt sowohl aus geometrischen als auch aus verkehrlichen Bedingungen. Es gibt einen Bereich im Vor- und Nachfeld eines Knotenpunkts, der vom Knotenpunkt beeinflusst wird und in dem die Verlustzeiten entstehen. [VORTISCH et al., 2020] Aus den Videos ist ersichtlich, dass der beobachtete Ausschnitt bereits im beeinflussten Bereich liegt, weshalb eine Kalibrierung anhand der Verlustzeiten nicht möglich ist.
- **Grenzzeitlücken:** Die Grenzzeitlücken ließen sich durch eine zusätzliche Auswertung (vgl. [WACHSMANN, 2016]) bestimmen. Jedoch merken VORTISCH et al. [2020] hierzu kritisch an, dass auch bei der Auswertung mehrerer Stunden an verschiedenen Knotenpunkten die statistisch notwendige Stichprobengröße nicht erreicht wird. Zudem ist bei vorfahrtgeregelten Knotenpunkten in der Regel die Nachfrage

nicht so hoch, dass die Nebenströme über längere Zeiträume nicht mehr abgewickelt werden können, also die Kapazität erreicht wird. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass „*der Einfluss der Hauptstrombelastung auf die Grenz- und Folgezeitlücken, ebenso wie auf die Wartezeiten, ... empirisch nicht bestimbar [ist]*“ [VORTISCH et al., 2020].

Darüber hinaus sind aus der Literatur folgende Kenngrößen bekannt:

- **Wartezeit:** Auch die Kalibrierung anhand der Wartezeit, anhand derer die QSV im HBS abgeleitet wird, sehen VORTISCH et al. [2020] kritisch. Neben der bereits im Rahmen der Grenzzeitlücken thematisierten fehlenden Stichprobengröße besteht hier zudem das Problem, dass nicht ermittelbar ist, welche Faktoren in der Realität sich auf die Wartezeiten ausgewirkt haben und in welchem Maße. Dies bedingt des Weiteren das Problem in der Simulation den richtigen Parametersatz zu finden, der verlässliche Wartezeiten bei abweichenden Belastungen liefert. [VORTISCH et al., 2020]
- **Kapazität nach HBS:** „*Eine weitere Möglichkeit, die Knotenpunkte anhand der Messdaten zu kalibrieren, besteht darin, dafür die zu betrachtende Zielgröße heranzuziehen.*“ [VORTISCH et al., 2020] In diesem Fall wäre dies die Kapazität nach HBS. Ob die Kapazität einzelner Zufahrten im Rahmen der Verkehrsuntersuchung erreicht wurden, lässt sich jedoch lediglich für die Zufahrten Z1 und Z3 und lediglich dadurch beurteilen, dass die Rückstaulängen selten über die Grenzen des Bildausschnitts hinausragten (ca. 40 m), es also zu keinem dauerhaften Rückstau gekommen ist. Für die Zufahrten Z2 und Z4 lassen sich diesbezüglich keinerlei Aussagen treffen.

In Anlehnung der Beschreibungen der QSV in FGSV [2015b] bewegt sich die Qualität des Verkehrsablaufs zwischen den QSV B und C. In den beurteilbaren Zufahrten Z1 und Z3 sind die wartepliktigen Fahrzeuge somit durch bevorrechtigte Fahrzeuge beeinflusst und die Wartezeiten sind gering bis spürbar. Bei der Bildung von Staus ist zu

beobachten, dass sich diese schnell wieder auflösen, also keine starke Beeinträchtigung darstellen.

Des Weiteren liegt den HBS-Werten für zweistufige Kreisverkehre eine Nutzung des linken Fahrstreifens der Zufahrten von rund 27 % der jeweiligen Verkehrsbelastung der Zufahrt zugrunde (vgl. Kapitel 4.4). Da die Nutzung der linken Fahrstreifen in der Realität jedoch stark variiert, wäre dies fehlerbehaftet.

- **Parameter der Simulation:** Eine weitere Möglichkeit, das Simulationsmodell der Realität anzunähern, ist es, Parameter, die in der Simulation zur Verfügung stehen, in der Realität zu ermitteln. Beispielsweise liefern SAMANDAR et al. [2022] eine Methodik zur Ermittlung der Grenz- und Folgezeitlücken aus Drohnenvideos mithilfe von KI. Die Definitionen der Zeitlücken orientiert sich dabei an den verfügbaren Parametern der eingesetzten Simulationssoftware. Es wird jedoch keine spezifische Angabe gemacht, welche Software benutzt wurde. Aus der Beschreibung der ermittelten Parameter lässt sich schließen, dass es sich nicht um ‚PTV Vissim‘ handelt. In ‚PTV Vissim‘ beeinflussen die Parameter der Konfliktflächen die FFE maßgeblich und können zu einem veränderten Fahrverhalten führen, welches sich insbesondere auf die Attribute für die Lücken vor und hinter Fahrzeugen auswirkt und zu Abweichungen von den eingestellten Werten führen kann. [PTV Group, 2024] Sinngemäß sind diese demnach eher als Hilfswerte für die Kalibrierung zu sehen, als als Werte, die in der Realität zu beobachten und zu messen sind.

Die Reisezeit ist somit eine der wenigen Kenngrößen, die aus der Verkehrsuntersuchung (Beobachtung) und aus ‚PTV Vissim‘ ermittelbar und vergleichbar ist. Im Gegensatz zur Nutzung der Grenzzeitlücken oder Wartezeiten ergibt sich hier zudem der Vorteil, dass eine größere Stichprobe zur Verfügung steht. Zu beachten ist dabei, dass die Reisezeitmessung auf einen Bereich begrenzt ist, der bereits vom Knotenpunkt beeinflusst ist. In Abbildung 90 ist dies dargestellt. Hieraus geht auch der Unterschied zur durch den Knotenpunkt verursachten Verlustzeit  $t_v$  hervor. Für jeden der einzelnen Verkehrsströme ergibt

sich die Notwendigkeit einer separaten Betrachtung, da die Länge der Wege, die die Fahrzeuge zum passieren des Knotenpunkts zurücklegen müssen, variiert.

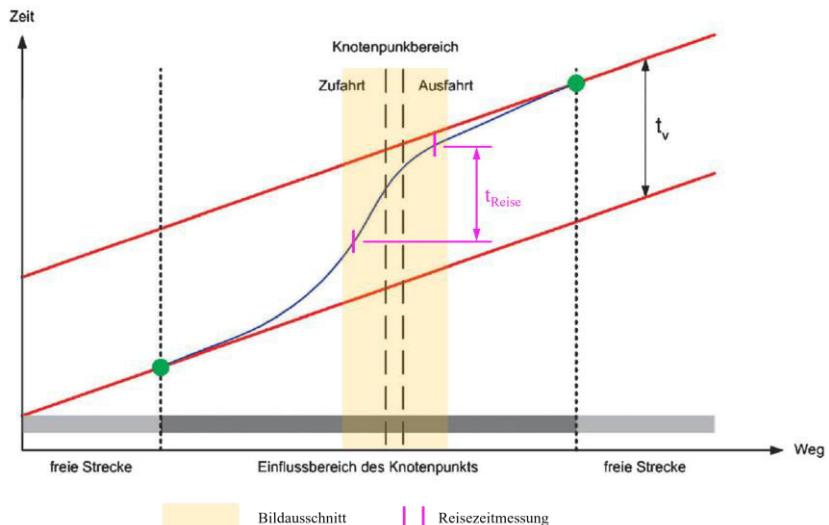


Abbildung 90: Weg-Zeit-Diagramm eines Verkehrsstroms mit Darstellung des Einflussbereichs des Knotenpunkts, des Bildausschnittes sowie der Reisezeitmessung, nach [SCHUCKLIEß et al., 2003; VORTISCH et al., 2020]

Die Reisezeiten beinhalten in diesem Fall jeweils die eigentliche Reisezeit, um von A nach B zu kommen, Verlustzeiten in den Zufahrten aus Beachtung der Vorfahrt für den übergeordneten Strom (Wartezeiten) sowie Verlustzeiten auf der Kreisfahrbahn und den Ausfahrten aus der Interaktion mit anderen Fahrzeugen. Hierbei sind bei allen drei Komponenten mehr oder weniger starke Abweichungen und Unterschiede zu erwarten. Um hierbei möglichst viele Einflussfaktoren isoliert betrachten zu können, wird ein zweistufiges Kalibrierungsprozedere angewendet.

In einem ersten Schritt sollen dabei die Reisezeiten gemessen werden, nachdem die Fahrzeuge die Zufahrt verlassen haben und sich bereits auf der

Kreisfahrbahn befinden. Dies eliminiert den Einfluss der Wartezeiten in den Zufahrten und soll eine Kalibrierung der Parameter für das Fahrzeugfolgmodell ermöglichen sowie die in den Langsamfahrbereichen hinterlegten *vWunsch* validieren, die bereits anhand der gemessenen Momentangeschwindigkeiten in die Langsamfahrbereiche implementiert wurden.

Die Messquerschnitte werden dabei wie in Abbildung 91 dargestellt festgelegt. Hierbei ist darauf zu achten, dass in „PTV Vissim“ die Startquerschnitte auf den Verbindern liegen, damit nur die einfahrenden FFE bei der Reisezeitmessung berücksichtigt werden und nicht auch FFE eines anderen Verkehrsstroms. Aufgrund des begrenzten Bildausschnittes der Videoerfassung beschränkt sich die Messung der Reisezeiten auf die Zufahrten Z1 und Z3, wobei die daraus gewonnenen Erkenntnisse auf Z2 und Z4 übertragen werden.



Abbildung 91: Definition der Messquerschnitte für die Reisezeitmessungen ohne Zufahrten

Zu den Reisezeitanteilen der jeweiligen Reisezeitmessungen ist anzumerken, dass die Reisezeiten der Fahrzeuge auf den rechten Fahrstreifen aus den beiden

Komponenten Weg und Geschwindigkeit bestehen. Potenziell werden die Reisezeiten des Weiteren nur durch Verlustzeiten aus der Interaktion mit vorausfahrenden Fahrzeugen beeinflusst, nicht jedoch durch Verlustzeiten aus der Beachtung von Vorfahrt oder Vorrang bei der Ausfahrt. Letztere wirken sich lediglich auf die Reisezeiten der Fahrzeuge auf den linken Fahrstreifen aus.

Zur Überprüfung der Vergleichbarkeit der Reisezeitmessungen werden die zurückgelegten Wege analysiert. Die real zurückgelegten Wege der einzelnen Fahrzeuge variieren dabei mehr oder weniger stark aufgrund des menschlichen Fahrverhaltens, während die zurückgelegten Wege in ‚PTV Vissim‘ für jede FFE die gleiche Länge aufweisen. Die ausgegebene Länge entspricht gemäß PTV Group [2024] dem kürzest möglichen Weg. Tabelle 12 und Tabelle 13 zeigen eine Übersicht über die Werte für die zurückgelegten Wege im Rahmen der Reisezeitmessungen aus der Verkehrsuntersuchung und aus dem ‚PTV Vissim‘ Basismodell.

Bei den Längen der Wege der Fahrzeuge auf den rechten Fahrstreifen (Tabelle 12) lässt sich festhalten, dass die Längen in ‚PTV Vissim‘ tendenziell den Minima der real zurückgelegten Wegen entsprechen. Im Vergleich mit den Mittelwerten der Beobachtung sind die Weglängen in ‚PTV Vissim‘ geringer.

Für die Fahrzeuge auf den linken Fahrstreifen (Tabelle 13) wird hingegen eine systematische Abweichung bei den Längen der zurückgelegten Wege, insbesondere bei den Linksabbiegern deutlich. Die Wege in ‚PTV Vissim‘ sind durchgehend länger als in der Realität. Im Vergleich zum Mittelwert der Beobachtung sind Abweichungen von bis zu 6,4 % zu beobachten. Dies liegt an gegensätzlichen Anforderungen an die Modellierung. Die Verbinder müssten zur besseren Annäherung an die reale Fahrweise eine größere Ausdehnung aufweisen (Abbildung 92). Dadurch würden im Bereich der für die Routenwahl notwendigen kurzen einstreifig modellierten Elemente der Kreisfahrbahn zusätzliche Konfliktflächen auf engem Raum entstehen, wodurch das Modell stark verkompliziert würde. Für jeder der Konfliktflächen wäre eine Vorfahrtsregelung mit verschiedenen Parametern zu definieren, welche wiederum Auswirkungen auf das Fahrverhalten der FFE stromaufwärts hätte. Dadurch würde die Handhabbarkeit des Modells negativ beeinflusst.

Eine Optimierung der Verbinder ist daher nur in gewissem Umfang sinnvoll. Auch würde diese Art der Optimierung nicht zwingend zu einer besseren Annäherung der Wegelängen führen. Deshalb wird auf eine Anpassung der Verbinder verzichtet und das Basismodell als Grundlage der Kalibrierung genutzt. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist dies zu berücksichtigen.

Tabelle 12: Differenzen der zurückgelegten Wegelängen der Fahrzeuge der rechten Fahrstreifen

		q2 (RA)	q3 (RA)	q8 (RA)	q9 (RA)
Beobachtung	Min	110,0 m	26,9 m	98,7 m	26,2 m
	MW	112,5 m	27,4 m	101,7 m	26,5 m
	Max	115,9 m	28,1 m	103,6 m	27,2 m
	s	1,4 m	0,3 m	1,3 m	0,3 m
	n	25 Fz	32 Fz	26 Fz	17 Fz
'PTV Vissim'		110,0 m	26,8 m	99,0 m	26,1 m
Abweichung 'PTV Vissim' zu MW Be- obachtung		-2,2 %	-2,2 %	-2,7 %	-1,5 %

Tabelle 13: Differenzen der zurückgelegten Wegelängen der Fahrzeuge der linken Fahrstreifen

		q1 (LA)	q2 (LA)	q7 (LA)	q8 (LA)
Beobachtung	Min	126,2 m	111,6 m	115,7 m	103,4 m
	MW	128,1 m	113,5 m	117,1 m	105,2 m
	Max	132,9 m	117,5 m	119,2 m	107,3 m
	s	0,4 m	1,3 m	1,4 m	1,1 m
	n	5 Fz	22 Fz	8 Fz	11 Fz
'PTV Vissim'		136,3 m	118,6 m	124,4 m	108,0 m
Abweichung 'PTV Vissim' zu 'MW Be- obachtung'		+6,4 %	+4,5 %	+6,2 %	+2,7 %

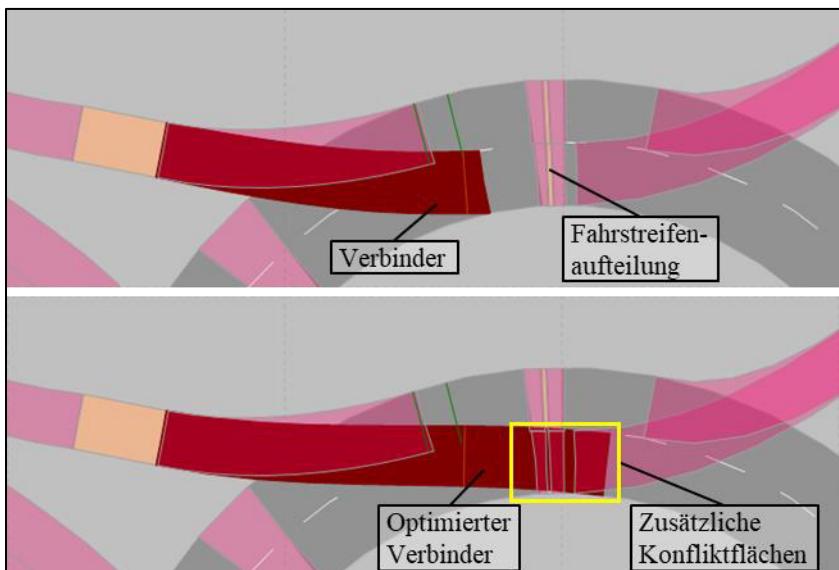


Abbildung 92: Im Basismodell modellierte Verbinder (oben) und zusätzliche Konfliktflächen durch die Optimierung der Verbinder (unten)

Die in der Realität gemessenen Reisezeiten im Intervall 6 zwischen 07:28:14 Uhr und 07:33:39 Uhr lassen sich wie in Abbildung 94 bis Abbildung 96 dargestellt auf Klassen der Breite 0,5 s aufteilen. Dargestellt ist die relative Häufigkeit der einzelnen Klassen sowie die kumulierte Häufigkeit. Abbildung 97 und Abbildung 98 zeigen in Ergänzung die Verteilung der Messwerte als Box-Whisker-Plot je Verkehrsstrom.

Erwartungsgemäß weisen die beiden Rechtsabbiegeströme q3 und q9 die größte Homogenität der gemessenen Reisezeiten auf, da hier der vergleichsweise kürzeste Weg zurückgelegt werden muss, bei gleichzeitig geringster Wahrscheinlichkeit von Interaktion mit vorausfahrenden Fahrzeugen. Die Geraudeausströme q2 und q8 weisen sowohl für die beiden Zufahrten als auch für den linken und rechten Fahrstreifen untereinander lediglich geringe Abweichungen auf, trotz unterschiedlich langer Wege. Die beiden Linksabbiegeströme q1 und q7 weisen sehr differenzierte Ergebnisse auf. Durch die äußerst

geringe Anzahl an Messwerten von fünf (q1) respektive acht (q7) Fahrzeugen sind die Ergebnisse zudem nicht zur Kalibrierung geeignet.

Aufgrund der geringen Anzahl an Fahrzeugen bestehen einzelne Klassen aus nur einem einzelnen Messwert. Je geringer die Anzahl an Fahrzeugen, desto häufiger ist dies der Fall und desto geringer ist die Aussagekraft der jeweiligen Verteilung.

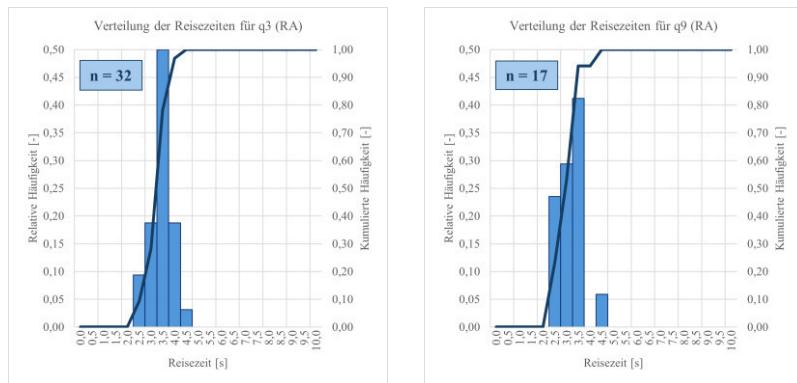


Abbildung 93: Verteilung der Reisezeiten für q3 (RA) und q9 (RA) bei einer Klassenbreite von 0,5 s

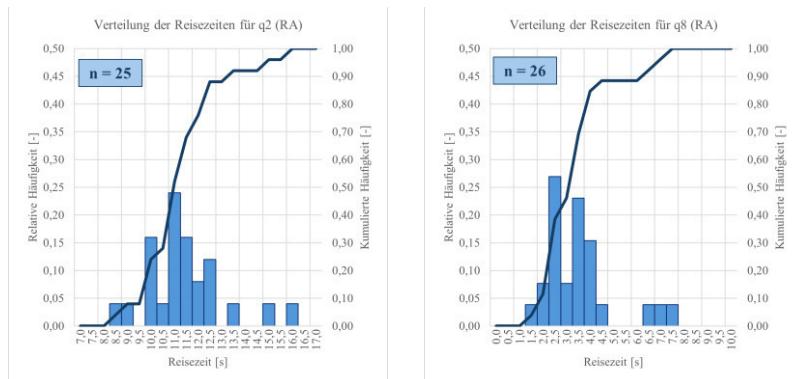


Abbildung 94: Verteilung der Reisezeiten für q2 (RA) und q8 (RA) bei einer Klassenbreite von 0,5 s

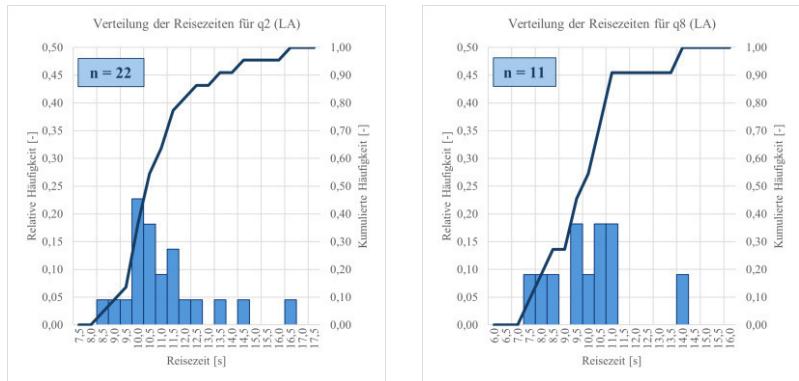


Abbildung 95: Verteilung der Reisezeiten für q2 (LA) und q8 (LA) bei einer Klassenbreite von 0,5 s

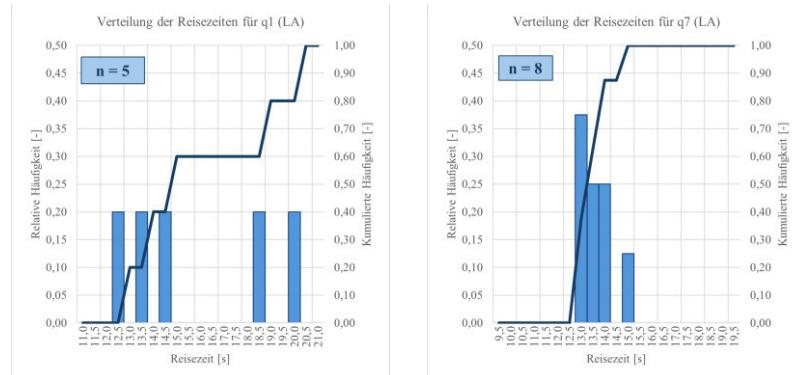


Abbildung 96: Verteilung der Reisezeiten für q1 (LA) und q7 (LA) bei einer Klassenbreite von 0,5 s

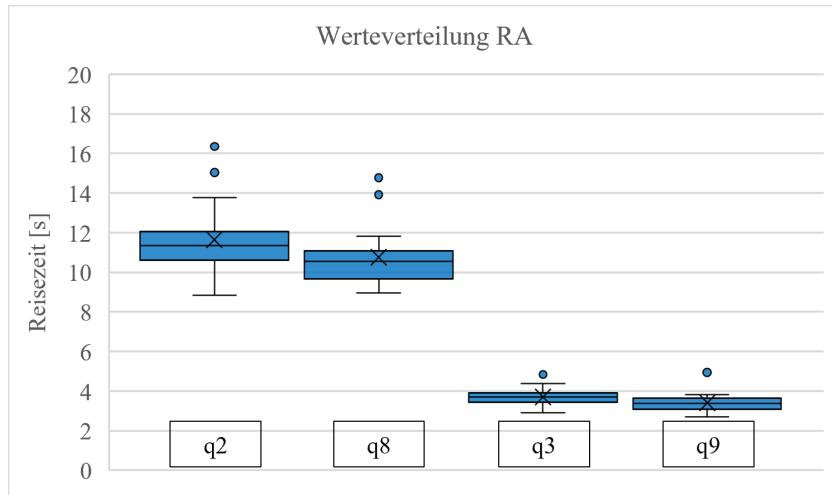


Abbildung 97: Box-Whisker-Plots der gemessenen Reisezeiten der Fahrzeuge der rechten Fahrstreifen der Zufahrten getrennt nach Verkehrsströmen

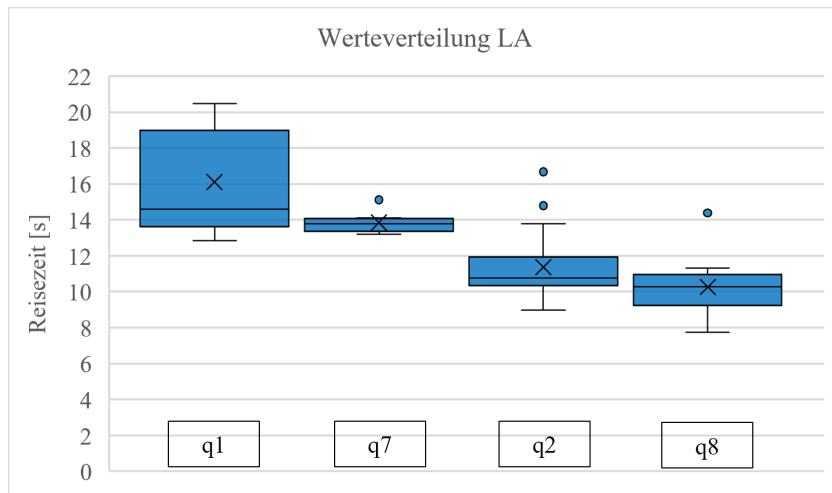


Abbildung 98: Box-Whisker-Plots der gemessenen Reisezeiten der Fahrzeuge der linken Fahrstreifen der Zufahrten getrennt nach Verkehrsströmen

### 7.4.3 Methodik der Kalibrierung

Die Kalibrierung erfolgt durch den Vergleich der gemessenen Reisezeiten aus der Verkehrsuntersuchung (Beobachtung) mit denen der Simulation. Für die einzelnen Kalibrierungsschritte wird in Anlehnung an VORTISCH et al. [2020] eine Anzahl von zehn Simulationsläufen mit unterschiedlichen Startzufallszahlen zugrunde gelegt. Um die Ergebnisse zu verifizieren, wird jeder Kalibrierungsschritt dann mit 100 Simulationsläufen mit unterschiedlichen Startzufallszahlen wiederholt.

Zur Interpretation der Kalibrierungsschritte ist es notwendig, ein Fehlermaß zu definieren. Hierzu kommen die nachfolgend erläuterten Ansätze infrage.

Nach FGSV [2006a] ist die ‚Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers‘ (Root Mean Square Error, RMSE) ein übliches Maß. Diese ist jedoch nicht für einzelne Wertepaare bestimmbar, da die Anzahl der Werte aus der Simulation systembedingt meist nicht der Anzahl der gemessenen Werte entspricht. Hierzu müssen bereits statistisch bestimmte Werte miteinander verglichen werden, beispielsweise die Minima, Maxima sowie die Quartile und die Mittelwerte aus Beobachtung und Simulation. Dies gilt auch für die ‚durchschnittliche absolute Abweichung‘ (Mean Absolute Deviation, MAD), die ebenfalls als Fehlermaß in Betracht gezogen werden kann. Der Vergleich zwischen MAD und RMSE kann einen Hinweis auf die Größe der Ausreißer geben. Wenn RMSE viel größer als MAD ist, bedeutet dies, dass es einige starke Ausreißer in den Daten gibt, die RMSE stärker beeinflussen als MAD. Beide Werte liefern keine Aussage darüber, ob die simulierten Reisezeiten länger oder kürzer als die gemessenen sind, weshalb die grafische Darstellung bei der Interpretation hilfreich ist.

In Abbildung 99 sind beispielhaft die Ergebnisse einer statistischen Verteilung der Werte der Beobachtung (blau) sowie von zehn Simulationsläufen (gelb) für den Strom q2 (RA) dargestellt. Zusätzlich zeigt Tabelle 14 Werte für MAD und RMSE der Simulationen bezogen auf die jeweiligen statistischen Kennwerte der Beobachtung.

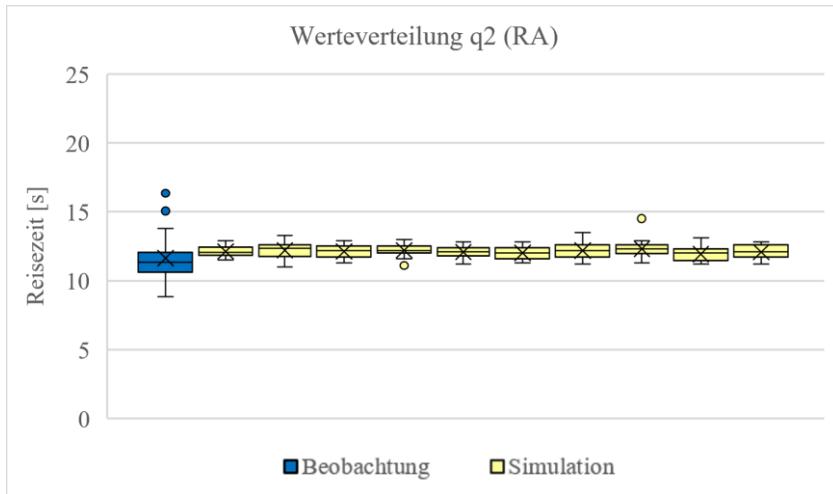


Abbildung 99: Vergleich der Reisezeiten für q2 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Basismodell

Tabelle 14: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (RA) – Basismodell

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	8,8	2,40	2,40	27,15	27,15
1. Quartil	10,6	1,11	1,12	10,46	10,56
Median	11,4	0,75	0,76	6,61	6,70
3. Quartil	12,1	0,38	0,39	3,15	3,24
Maximum	16,4	3,04	3,13	18,59	19,14
Mittelwert	11,6	0,46	0,47	3,95	4,04

VORTISCH et al. [2020] nutzen als Fehlermaße für die Interpretation der Simulationsergebnisse zum einen die prozentuale Überschneidung  $\hat{U}$  zwischen den Werten aus Beobachtung und Simulationen (relative Anteile einer Klasse) und zum anderen die prozentuale Abweichung der Mediane  $A$ . Diese lassen sich nach Formel (7-19) und (7-20) berechnen.

$$\ddot{U} = \sum \min(x_{sim}, x_{obs}) \quad (7-19)$$

mit:

- $\ddot{U}$  = Überschneidung [%]
- $x_{sim}$  = rel. Anteil einer Klasse (Simulation)
- $x_{obs}$  = rel. Anteil einer Klasse (Beobachtung)

$$A = 100 * \frac{|\tilde{x}_{obs} - \tilde{x}_{sim}|}{\tilde{x}_{obs}} \quad (7-20)$$

mit:

- $A$  = Abweichung der Mediane [%]
- $\tilde{x}_{sim}$  = Median der simulierten Zeiten [s]
- $\tilde{x}_{obs}$  = Median der gemessenen Zeiten [s]

Stimmen Beobachtung und Simulation exakt überein, beträgt  $\ddot{U} = 100\%$  und  $A = 0\%$ . Auch hierbei dient eine grafische Darstellung zur besseren Interpretation, da beide Werte keine Aussage darüber liefern, in welchen Klassen die Abweichungen zu verorten sind. Abbildung 100 zeigt beispielhaft die überlagerten Werte der relativen Häufigkeiten aus Beobachtung und Simulation, die kumulierten Häufigkeiten, aus denen die Mediane abzulesen sind, sowie die Werte der berechneten Fehlermaße  $\ddot{U}$  und  $A$  für den Strom q2 (RA).

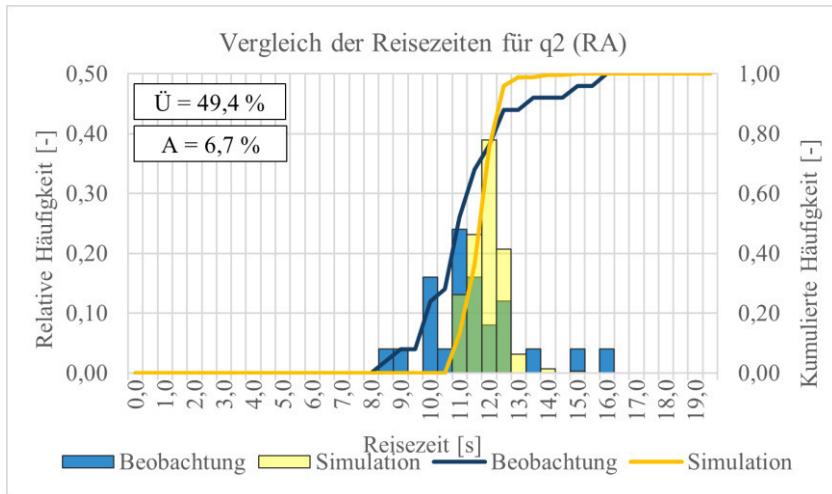


Abbildung 100: Überlagerte Werte der relativen Häufigkeiten sowie kumulierte Häufigkeiten aus Beobachtung und Simulation für q2 (RA) – Basismodell

VORTISCH et al. [2020] erreichen bei Kalibrierung der Durchfahrtszeit an LSA-gesteuerten Knotenpunkten Werte für  $\bar{U}$  zwischen 59 % und 85 %, sowie Werte für  $A$  zwischen 1 % und 4 %, womit eine gute Übereinstimmung vorliegt. Für Reisezeiten sind generell größere Abweichungen und eine weniger gute Kalibrierung zu erwarten, da mehr äußere Einflüsse und Interaktionen mit anderen Fahrzeugen stattfinden. Aufgrund der geringen Stichprobe und der daraus resultierenden geringen Anzahl an Werten je Klasse stellt in der vorliegenden Arbeit die Verteilung eine wenig belastbare Grundlage dar.

Aufgrund der teils geringen Umfänge der Stichproben wird eine Beurteilung der Kalibrierung anhand der MAD und dem RMSE der statistischen Kennwerte als zielführend eingestuft. Bezüglich der zu erwartenden Genauigkeiten für MAD und RMSE sind gemäß FGSV [2006a] Genauigkeiten bei der Kalibrierung zwischen 10 % und 18 % zu erwarten, wobei für die Validierung um 1 % bis 5 % höhere Abweichungen möglich sind.

## 7.4.4 Durchführung der Kalibrierung

Im nachfolgenden wird die Kalibrierung iterativ durchgeführt. Die einzelnen Iterationen werden als Kalibrierungsschritte bezeichnet und aufsteigend nach dem Alphabet benannt. In Kalibrierungsschritt A erfolgt zunächst die Überprüfung des Basismodells auf Validität. Ist diese nicht gegeben, wird in den daran anschließenden Kalibrierungsschritten jeweils ein ausgewählter Parameter des Simulationsmodells angepasst und die Ergebnisse der Simulationen hinsichtlich deren Annäherung an die real gemessenen Werte überprüft. Wird die Anpassung des jeweiligen Parameters als zielführend eingestuft, wird diese beibehalten, andernfalls wird die Änderung in einem nächsten Kalibrierungsschritt angepasst oder verworfen. Wird sie verworfen, erfolgt die Änderung eines anderen Parameters. Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis keine signifikante Verbesserung mehr festzustellen ist. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt in Gruppen vergleichbarer Verkehrsströme.

### Kalibrierungsschritt A (Prüfung des Basismodells auf Validität)

In Kalibrierungsschritt A wird geprüft, ob die bisher eingestellten Parameter bereits ein valides Modell ergeben.

#### **RA- Geradeaus (q2 und q8)**

Für **q2** weist der Interquartilsabstand (IQR) im Rahmen der Beobachtung eine größere Spannweite als der IQR der Simulationsläufe auf (Abbildung 99). Die Abweichungen von MAD und RMSE zu der Beobachtung bewegen sich für die Quartile 1 bis 3 in einem Bereich zwischen 3,3 % und 10,7 % (Tabelle 15). Dies stellt eine ausreichende Übereinstimmung dar, obwohl die FFE tendenziell zu lange Reisezeiten aufweisen.

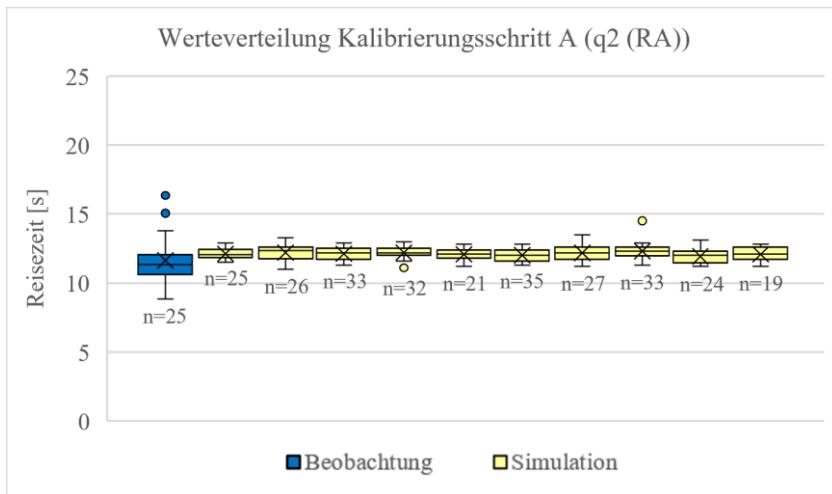


Abbildung 101: Vergleich der Reisezeiten für q2 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A

Tabelle 15: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (RA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	8,8	2,4	2,4	27,0	27,0
1. Quartil	10,6	1,1	1,1	10,6	10,7
Median	11,4	0,8	0,8	6,6	6,7
3. Quartil	12,1	0,4	0,4	3,3	3,5
Maximum	16,4	3,1	3,23	19,1	19,5
Mittelwert	11,6	0,5	0,5	4,1	4,3

Für **q8** weist der IQR im Rahmen der Beobachtung eine größere Spannweite als der IQR der Simulationsläufe auf (vgl. Abbildung 102). Die Abweichungen von MAD und RMSE zu der Beobachtung bewegen sich für die Quartile 1 bis 3 in einem Bereich zwischen 2,8 % und 4,9 % (vgl. Tabelle 16). Dies stellt für

diesen Bereich eine noch bessere Übereinstimmung der Reisezeiten dar als bei q2.

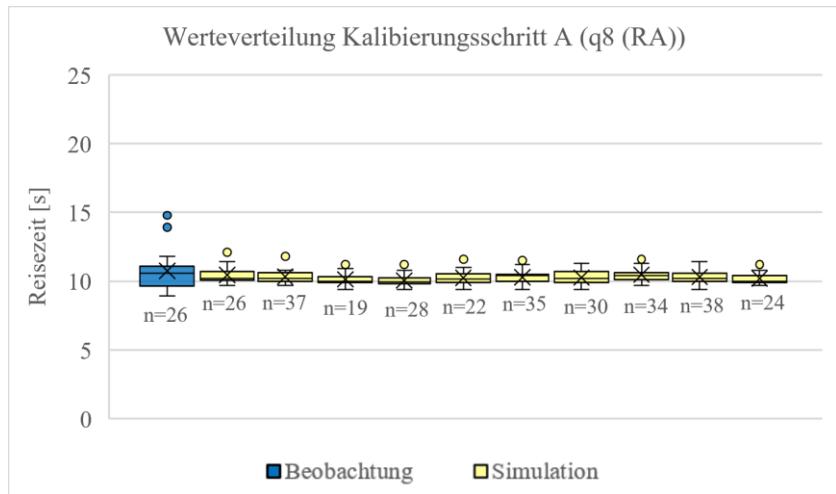


Abbildung 102: Vergleich der Reisezeiten für q8 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A

Tabelle 16: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (RA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	8,9	0,5	0,6	5,9	6,2
1. Quartil	9,7	0,3	0,4	3,5	3,7
Median	10,6	0,3	0,3	2,8	3,0
3. Quartil	11,1	0,5	0,5	4,7	4,9
Maximum	14,8	3,8	4,6	25,5	31,0
Mittelwert	10,8	0,5	0,5	4,3	4,7

### RA – Rechtsabbieger (q3 und q9)

Für **q3** weist der IQR im Rahmen der Beobachtung eine größere Spannweite als der IQR der Simulationsläufe auf (vgl. Abbildung 103) und die Reisezeiten aus den Simulationen sind durchweg geringer als die der Beobachtung. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass bei den Rechtsabbiegern sehr kurze Reisezeiten vorliegen (zwischen 2,9 s und 4,8 s) und daher bereits geringe Abweichungen (hier zwischen 0,1 s und 1,3 s) prozentual gesehen stärker ins Gewicht fallen als bei längeren Reisezeiten (vgl. Tabelle 17).

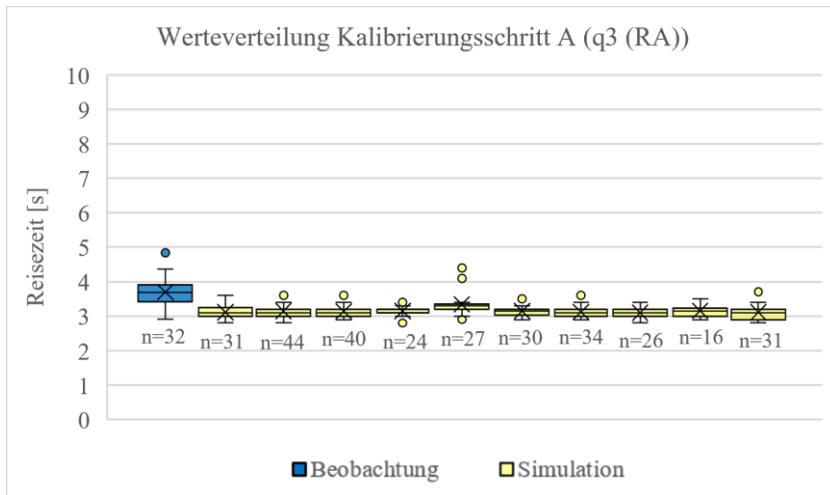


Abbildung 103: Vergleich der Reisezeiten für q3 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A

Tabelle 17: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q3 (RA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	2,9	0,1	0,1	2,5	3,0
1. Quartil	3,4	0,4	0,4	11,5	11,5
Median	3,7	0,6	0,6	14,8	14,9
3. Quartil	3,9	0,7	0,7	17,0	17,0
Maximum	4,8	1,2	1,2	25,0	25,3
Mittelwert	3,7	0,6	0,6	14,8	14,8

Wie bereits q3 weist auch **q9** sehr kurze Reisezeiten auf (zwischen 2,7 s und 4,9 s) (vgl. Tabelle 18 sowie Abbildung 104).

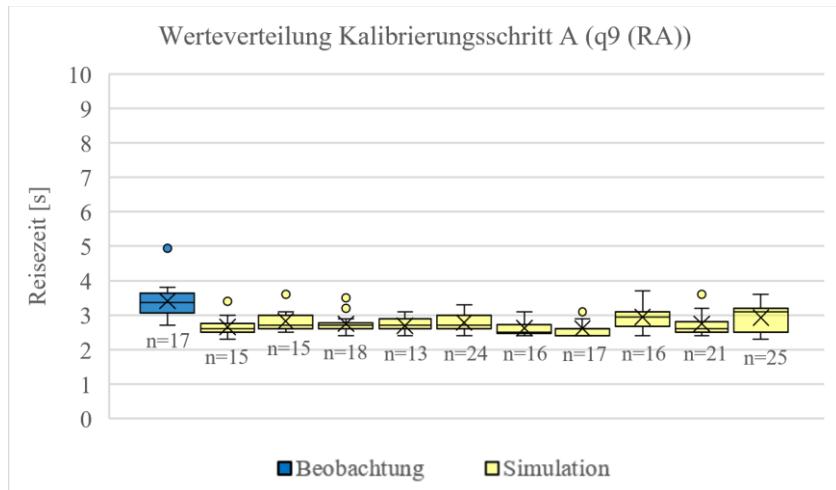


Abbildung 104: Vergleich der Reisezeiten für q9 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A

Tabelle 18: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q9 (RA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe)

Statis-tischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	2,7	0,3	0,3	11,9	12,1
1. Quartil	3,1	0,5	0,5	17,4	17,5
Median	3,4	0,7	0,7	21,3	21,5
3. Quartil	3,6	0,8	0,8	21,0	21,3
Maximum	4,9	1,6	1,6	32,0	32,4
Mittelwert	3,4	0,7	0,7	19,9	20,0

### LA – Geradeaus (q2 und q8)

Für **q2** weist der IQR der Simulationsläufe häufig eine sehr große Spannweite auf, zudem gibt es systematisch starke Ausreißer nach oben, während die Werte aus der Beobachtung deutlich homogener sind (vgl. Abbildung 105). Zudem weisen die Simulationen durchweg höhere Reisezeiten als die Beobachtung auf (vgl. Tabelle 19), was zumindest zum Teil den in Kapitel 7.4.2 dargelegten Unterschiede bei den Weglängen zugeordnet werden kann.

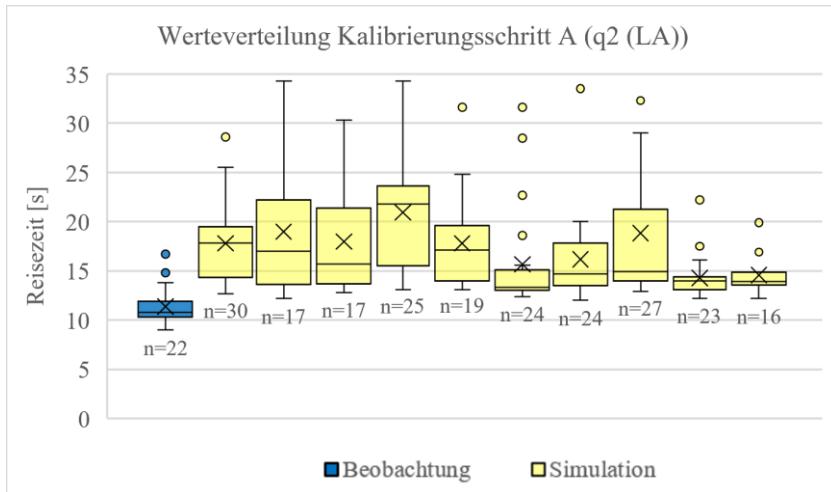


Abbildung 105: Vergleich der Reisezeiten für q2 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A

Tabelle 19: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (LA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	9,0	3,6	3,7	40,4	40,7
1. Quartil	10,3	3,6	3,8	35,3	37,0
Median	10,8	5,0	5,4	46,6	50,4
3. Quartil	11,9	7,0	7,8	59,0	65,7
Maximum	16,7	13,3	16,0	79,4	95,7
Mittelwert	11,4	5,8	6,1	51,1	54,1

Für **q8** weist der IQR der Simulationsläufe ebenfalls in der Regel eine sehr große Spannweite auf, die Ausreißer nach oben sind ebenfalls ausgeprägt. Auch für q8 ist zu beobachten, dass die Werte aus der Beobachtung eher homogen sind (vgl. Abbildung 106). Die Simulationen weisen ebenfalls

durchweg höhere Reisezeiten als die Beobachtung auf (vgl. Tabelle 20), was ebenfalls zumindest zum Teil den in Kapitel 7.4.2 dargelegten Unterschiede bei den Weglängen zugeordnet werden kann.

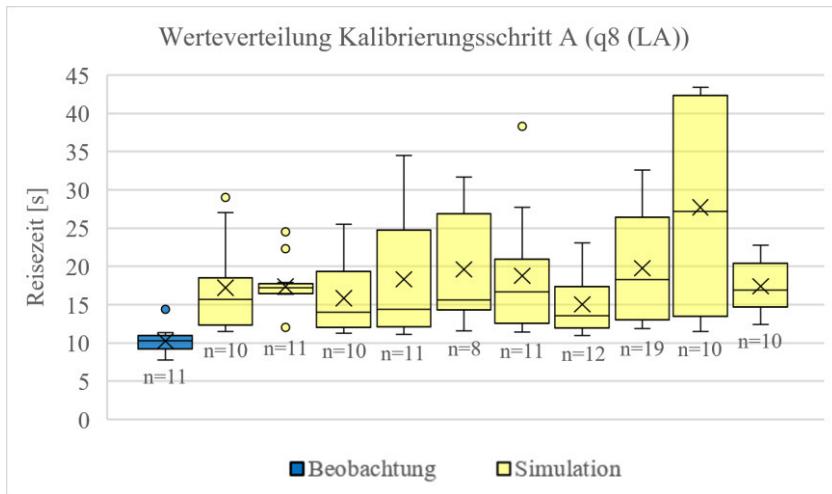


Abbildung 106: Vergleich der Reisezeiten für q8 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A

Tabelle 20: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (LA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	7,7	3,8	3,8	48,6	49,3
1. Quartil	9,2	4,6	5,0	49,7	54,4
Median	10,3	6,8	7,7	66,5	75,1
3. Quartil	10,9	11,2	12,5	101,9	114,42
Maximum	14,4	16,7	18,9	115,9	131,4
Mittelwert	10,3	8,3	9,0	81,0	87,3

## LA – Linksabbieger (q1 und q7)

Die Stichprobe für q1 ist mit fünf Fahrzeugen sowie für q7 mit acht Fahrzeugen deutlich geringer als bei den bisher betrachteten Strömen. Dadurch sind die Ergebnisse weniger aussagekräftig, werden jedoch bei der Kalibrierung mitberücksichtigt, um die Auswirkungen auch auf diese Ströme nicht außer Acht zu lassen. Aufgrund der geringen Datenlage wird jedoch auf eine Optimierung verzichtet.

Bei **q1** weist der IQR im Rahmen der Simulationen deutlich heterogene Spannweiten auf, wodurch eine Interpretation zusätzlich erschwert wird (vgl. Abbildung 107). Dennoch weisen die Werte der Simulationen geringere Abweichungen in Bezug auf MAD und RMSE auf als bei q2 und q8 (vgl. Tabelle 21).

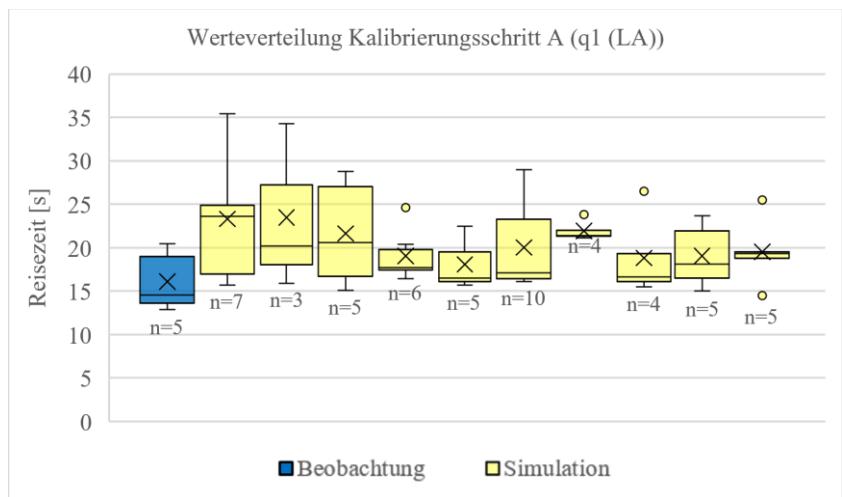


Abbildung 107: Vergleich der Reisezeiten für q1 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A

Tabelle 21: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q1 (LA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe)

Statis-tischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	12,9	3,4	4,4	26,8	34,0
1. Quartil	13,6	4,2	5,2	30,8	38,4
Median	14,6	5,1	6,4	35,1	43,8
3. Quartil	19,0	4,8	6,7	25,0	35,2
Maximum	20,5	8,2	10,8	40,2	52,9
Mittelwert	16,1	4,8	6,1	29,9	38,1

Bei **q7** weist der IQR im Rahmen der Simulationen mit Ausnahme eines Simulationslaufs eine homogenere Verteilung der Kennwerte als bei q1 auf (vgl. Abbildung 108). Auffällig ist, dass bei der Beobachtung eine sehr geringe Spannweite an Werten von lediglich rund 2 s festzustellen ist (vgl. Tabelle 22), obwohl es sich um die größte Wegelänge handelt und Interaktionen bei der Ausfahrt zu berücksichtigen sind.

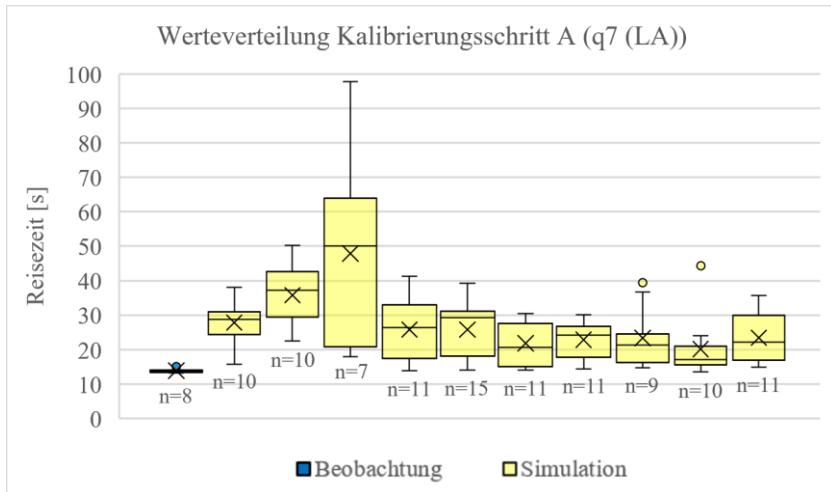


Abbildung 108: Vergleich der Reisezeiten für q7 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A

Tabelle 22: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q7 (LA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	13,2	2,0	3,0	15,4	22,9
1. Quartil	13,4	6,0	7,4	45,2	55,1
Median	13,8	11,4	13,0	82,7	94,6
3. Quartil	14,1	18,6	20,6	132,4	146,8
Maximum	15,1	28,3	30,9	187,3	204,1
Mittelwert	13,8	12,8	14,1	92,6	101,9

**Zwischenfazit:**

Zusammengefasst lassen sich für die Validität des Basismodells folgende Aussagen treffen:

- Die Reisezeiten der FFE der rechten Fahrstreifen zeigen durchgängig eine gute Übereinstimmung mit den Reisezeiten aus der Beobachtung, wobei die beiden Verkehrsströme q2 und q8 (Geradeaus) durch ihre hohe Übereinstimmung besonders hervorstechen. Alle Simulationsläufe weisen ähnliche Spannweiten des IQR auf und zeigen daher ein homogenes Bild. Die Verkehrsströme q3 und q9 (Rechtsabbieger) sind, wie bereits dargelegt, aufgrund ihrer kurzen Wegelängen nur bedingt aussagekräftig. In diesem Kontext werden sie als ausreichend genau interpretiert. Daher werden zunächst keine Anpassungen für die FFE der rechten Fahrstreifen vorgenommen.
- Die Reisezeiten der FFE der linken Fahrstreifen zeigen hingegen deutlich stärkere Abweichungen von den Reisezeiten der Beobachtung und sind deutlich heterogener verteilt. Es gibt teils starke Ausreißer. Die Abweichungen sind zu groß, um das Modell als valide einzustufen. Die Analyse der Reisezeiten der FFE der linken Fahrstreifen legt nahe, dass der Verkehrsfluss beeinträchtigt ist und dort Anpassungen erforderlich sind. Dies wird im folgenden Kalibrierungsschritt B untersucht.

**Kalibrierungsschritt B:**

Die Betrachtung des Verkehrsflusses der Fahrzeuge der linken Fahrstreifen erfolgt anhand der in Kapitel 6.6.3 dargestellten Methodik zum Auffinden von Bereichen mit verringerten Geschwindigkeiten. Abbildung 109 zeigt für die Fahrzeuge der linken Fahrstreifen die in der Beobachtung ermittelten Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten (Rot:  $v \leq 5$  km/h, Orange:  $> 5$  km/h bis  $\leq 10$  km/h) am Beispiel des Intervalls 6 von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr. Diese Bereiche decken sich prinzipiell in Bezug auf die Verortung der Bereiche mit denen bei anderen untersuchten Intervallen und können als Bereiche der Ausfahrten definiert werden. Abbildung 110 zeigt ergänzend hierzu die

Bereiche mit verzögerten Geschwindigkeiten für die Fahrzeuge der rechten Fahrstreifen. Wie bereits in Kapitel 6.6.3 erläutert, ist zu erkennen, dass es auf der Kreisfahrbahn wenige Bereiche gibt, in denen die Geschwindigkeiten verringert sind oder Fahrzeuge gar zum Halten kommen. Es ist dabei zudem kein Muster zu erkennen. Diese Beobachtungen sind für alle untersuchten Intervalle vergleichbar, insbesondere was die Häufigkeit des Auftretens von verringerten Geschwindigkeiten anbelangt.

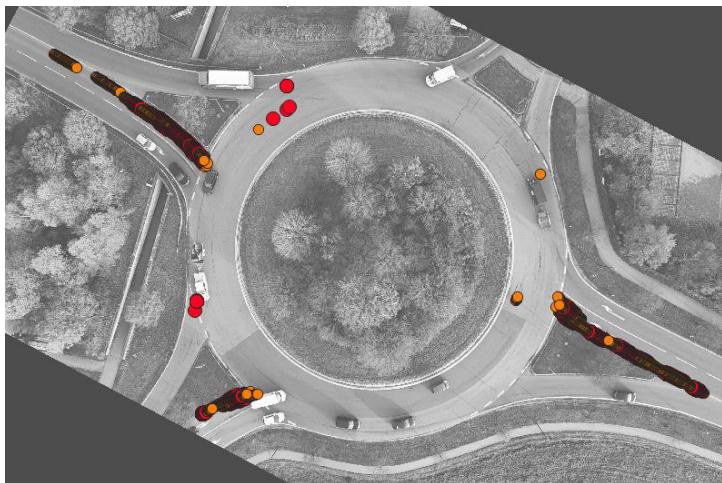


Abbildung 109: Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für die Fahrzeuge der linken Fahrstreifen der Zufahrten aus Beobachtung für das Intervall von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr



Abbildung 110: Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für die Fahrzeuge der rechten Fahrstreifen der Zufahrten aus Beobachtung für das Intervall von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr

Im Vergleich zur Beobachtung sind in den Simulationen hingegen regelmäßig Bereiche vor den Ausfahrten zu erkennen, in denen die Geschwindigkeiten reduziert sind und bei denen es sogar zur Stauung der FFE kommt (vgl. Abbildung 111). Diese wirken sich zudem auf den Verkehrsfluss der FFE auf den rechten Fahrstreifen aus (vgl. Abbildung 112 und Abbildung 113).



Abbildung 111: Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für die FFE der linken Fahrstreifen der Zufahrten aus Simulation für das Intervall von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr



Abbildung 112: Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für die FFE der rechten Fahrstreifen der Zufahrten aus Simulation für das Intervall von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr



Abbildung 113: Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten im Bereich der Zufahrt aus Simulation für das Intervall von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr

Eine Überprüfung in ‚PTV Vissim‘ zeigt die Ursache auf. Die FFE auf den linken Fahrstreifen zeigen trotz der bereits durchgeföhrten Anpassungen im Rahmen der Initialisierung des Basismodells (vgl. Kapitel 7.3.6) noch immer ein zögerliches Ausfahrerverhalten und beachten FFE, die gerade einfahren oder die sich auf dem äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn nähern, sehr früh. Die einfahrenden Fahrzeuge hingegen fahren augenscheinlich nicht kooperativ bzw. es fehlt ihnen an Vorausschauweite. Dies bedingt, dass den künftig einfahrenden FEE von den FFE auf dem inneren Fahrstreifen bereits Vorrang gewährt wird, noch bevor diese tatsächlich einfahren. Zudem erkennen die FFE auf dem äußeren Fahrstreifen einen potenziellen Konflikt und halten demnach die vor sich liegende Konfliktfläche frei, was wiederum das Einfahren weiterer FFE aus der Zufahrt ermöglicht.

Um dieses Verhalten zu ändern, wird zunächst überprüft, inwiefern eine Anpassung der Parameter der Querverkehrsstörungen zielführend ist. Hierzu dienen folgende drei Parameter:

- die Mindestzeitlücke (*MinZeitl*),
- die Mindestweglücke (*MinWegl*) und
- „*die maximale Geschwindigkeit, welche ein Fahrzeug des bevorrechtigten Stroms noch haben darf, damit es als störendes Fahrzeug erkannt wird*,“ [PTV Group, 2024] (*MaxGeschw*).

Der Parameter *MaxGeschw* wirkt sich lediglich auf die Mindestweglücke *MinWegl* aus. FFE werden hierfür nur berücksichtigt, wenn deren Geschwindigkeit  $\leq$  *MaxGeschw* ist. Haben FFE höhere Geschwindigkeiten als *MaxGeschw*, wird demnach nur noch *MinZeitl* berücksichtigt. Gemäß PTV Group [2024] ist die Relevanz der beiden Parameter *MinZeitl* und *MinWegl* von der jeweiligen Situation abhängig. Bei wertepflichtigen FFE, die, wie in der vorliegenden Situation, einen bevorrechtigten Verkehrsstrom kreuzen wollen und dabei normal fließender Verkehr vorherrscht, wird die *MinZeitl* relevant.

Daraus abgeleitet wird zum einen für *MaxGeschw* eine sehr hohe Geschwindigkeit festgelegt, damit prinzipiell keine FFE unbeachtet bleiben und zum anderen wird der Parameter *MinWegl* Null gesetzt, sodass lediglich der Parameter *MinZeitl* noch Auswirkungen auf die FFE hat und weitere Einflüsse auf das Verhalten aus der Querverkehrsstörung ausgeschlossen werden können. Die im Rahmen der Initialisierung des Basismodells gewählten Werte für die Parameter sind in Tabelle 23 dargelegt.

Tabelle 23: Parameter der Querverkehrsstörungen im Basismodell

<i>MinZeitl</i>	<i>MinWegl</i>	<i>MaxGeschw</i>
2,0	0,0	100,0

Problematisch zeigt sich noch die Anlage der Querverkehrsstörungen (Abbildung 114), die im Basismodell mit jeweils einem störenden Querschnitt (Grün) auf der Kreisfahrbahn und einem störenden Querschnitt auf dem Verbinder für die Ausfahrt im Abstand von rund 5 m modelliert ist.

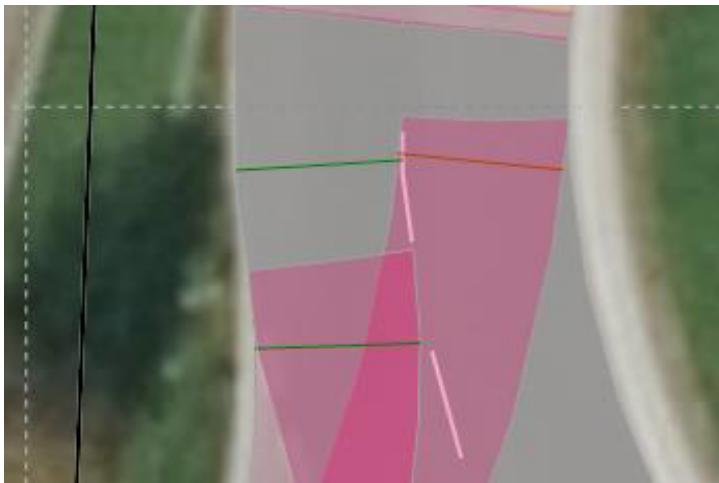


Abbildung 114: Ausbildung der Querverkehrsstörungen im Zuge der Ausfahrten

Durch Entfernen der störenden Querschnitte auf den Verbindern werden die möglichen Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten weiter reduziert.

Die Auswirkungen der Maßnahme auf das Ausfahrerverhalten sind zunächst nur als marginal einzustufen, jedoch kann nun eine Optimierung durch Anpassung des Parameters *MinZeitl* erfolgen. Dafür wird dieser mit dem Wert 1,0 s belegt.

Durch die Anpassung ist in der Visualisierung der Bereiche mit reduzierten Geschwindigkeiten auf Basis der Fahrzeugprotokolle zu erkennen, dass nahezu kein Rückstau mehr auf der Kreisfahrbahn auftritt. Damit gleicht sich das Modell den beobachteten Vorgängen der Realität an, weist aber tendenziell zu wenige Stellen auf, an denen die Geschwindigkeiten unter 10 km/h sinken (vgl. Abbildung 115). Gleichzeitig reduziert sich auch der Rückstau auf den linken Fahrstreifen der Zufahrten, die Rückstau-Situation auf den rechten Fahrstreifen lässt sich wie bereits erläutert nicht beurteilen.

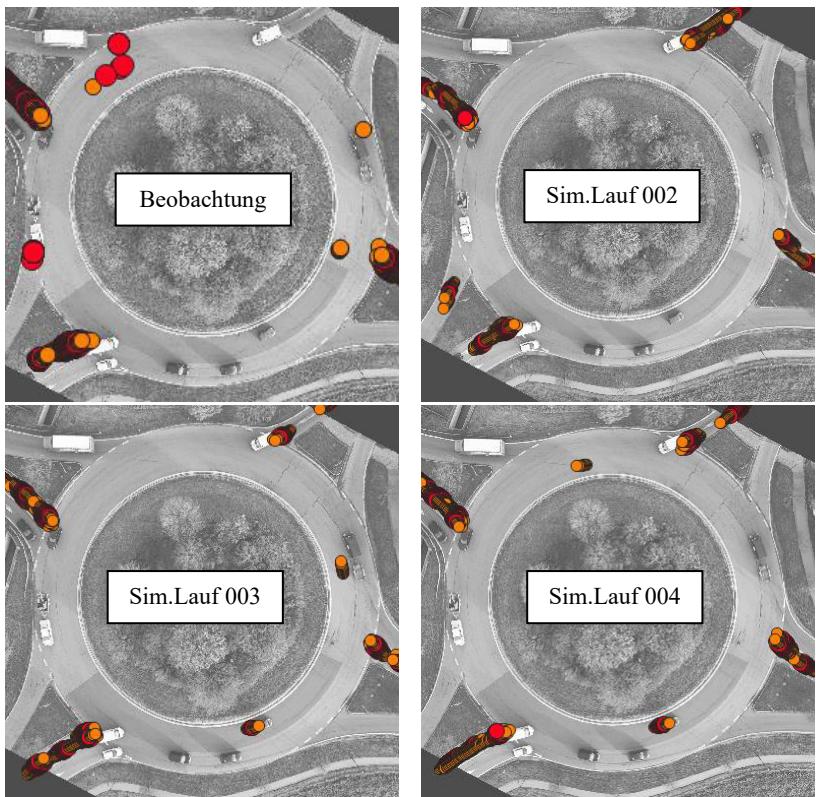


Abbildung 115: Vergleich der Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für verschiedene Simulationsläufe bei  $\text{MinZeit} = 1,0 \text{ s}$

Bezüglich der Reisezeitmessungen der Fahrzeuge der rechten Fahrstreifen sind wie zu erwarten lediglich marginale Änderungen zu protokollieren. Die Reisezeiten der Fahrzeuge der linken Fahrstreifen sind hingegen durch die vorgenommene Anpassung deutlich homogener ausgeprägt und zeigen Abweichungen zur Beobachtung für MAD von 2,4 % bis 42,7 % sowie für RMSE von 3,0 % bis 42,8 %. Die hohen Abweichungen für MAD und RMSE sind regelmäßig bei den Minima zu finden, während sich die Abweichungen für die Quartile 1, 2 und 3 zwischen 4,7 % und 26,4 % (MAD) respektive zwischen 5,2 % und 26,5 % (RMSE) bewegen. Jedoch ist auch festzuhalten, dass die

Reisezeiten mit Ausnahme des Verkehrsstroms  $q_1$  nach oben abweichen, also zu lange sind.

Obwohl eine Verbesserung zu beobachten ist, ist kritisch anzumerken, dass bedingt durch die Querverkehrsstörungen und der auf ‚passiv‘ gestellten Konfliktflächen in den Ausfahrten keine Interaktion zwischen den FFE mehr stattfindet. Durch die verringerte  $MinZeitl$  fahren die FFE abweichend von der Realität zu dicht aufeinander auf oder überlagern sich gar, vgl. Abbildung 116.

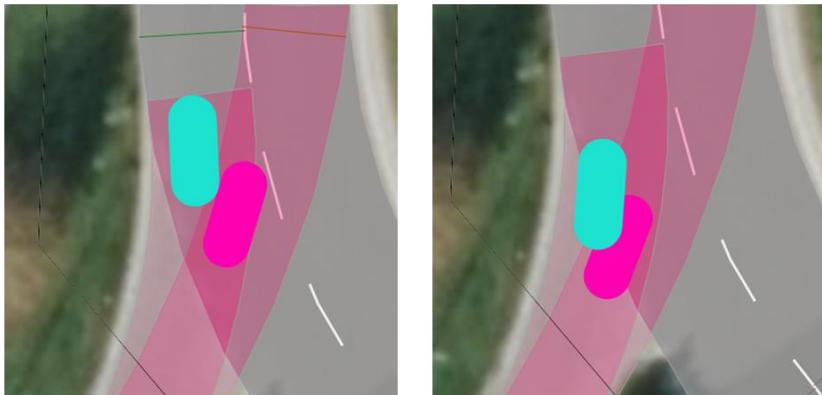


Abbildung 116: Fehlende Interaktion der FFE in den Ausfahrten

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass hier dem Modellcharakter Rechnung getragen werden muss. Eine weitere Anpassung des Parameters  $MinZeitl$  soll im folgenden Kalibrierungsschritt C eine Näherung an die Interaktion zwischen den FFE bei den Vorgängen ‚Ausfahren‘ und ‚Kreuzen‘ ermöglichen.

### **Kalibrierungsschritt C:**

Im Rahmen des Kalibrierungsschrittes C wird der Parameter  $MinZeitl$  von 1,1 s bis 1,5 s variiert. Dies wirkt sich für die FFE der linken Fahrstreifen der Zufahrten unterschiedlich stark auf die Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten auf der Kreisfahrbahn aus.

Für die Einstellung  $MinZeitl = 1,1$  s ist festzustellen, dass die Anzahl der Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten bereits zunimmt und sich der Beobachtung annähert (Abbildung 117).

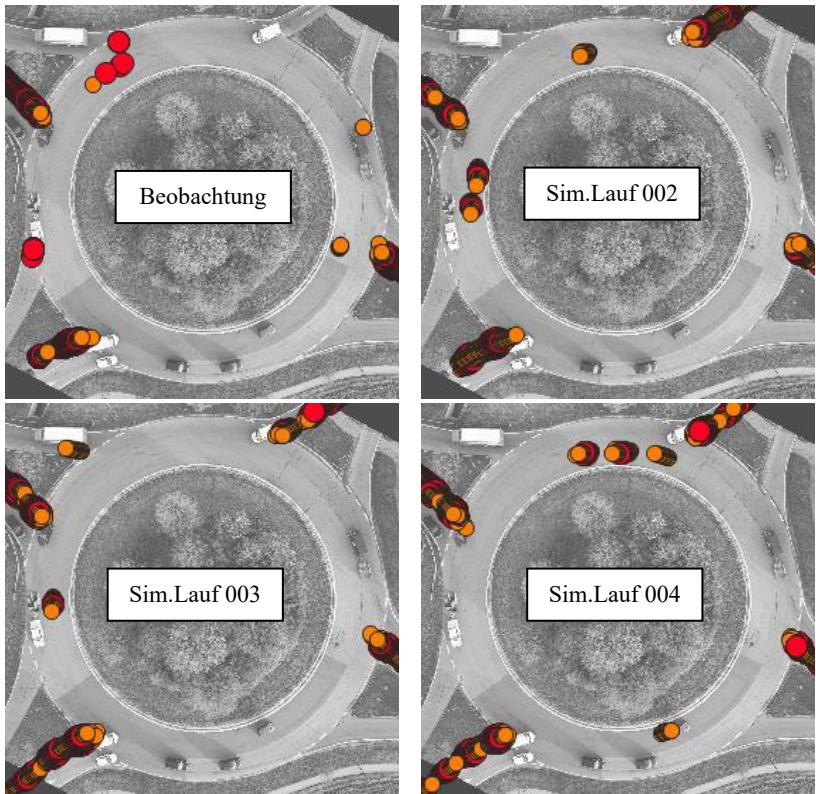


Abbildung 117: Vergleich der Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für verschiedene Simulationsläufe bei  $MinZeitl = 1,1$  s

Eine Erhöhung des Wertes für  $MinZeitl$  auf 1,2 s zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Simulation bei der Anzahl der Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten. Eine weitere Erhöhung von  $MinZeitl$  zeigt schnell eine starke Zunahme der Anzahl an FFE, die verringerte Geschwindigkeiten aufweisen (Abbildung 118).

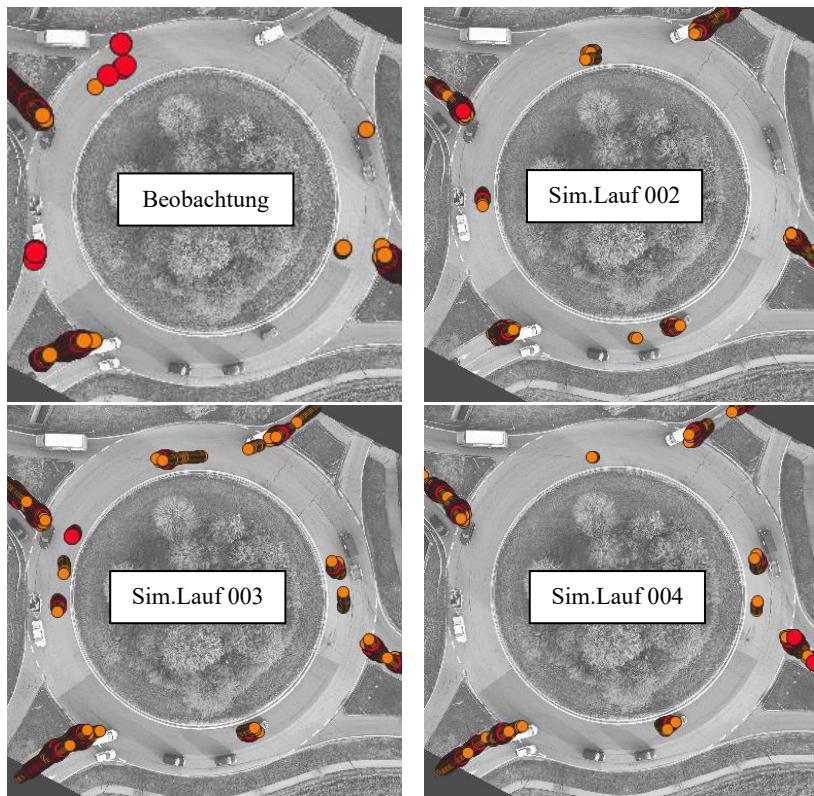


Abbildung 118: Vergleich der Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für verschiedene Simulationsläufe bei  $\text{MinZeitl} = 1,2$  s

Im Rahmen der Kalibrierungsschritts C wird deshalb der Parameter  $\text{MinZeitl}$  auf den Wert 1,2 s festgelegt. Dies wirkt sich wie erwartet nicht auf die Reisezeitmessungen der FFE auf den rechten Fahrstreifen aus, sondern führt lediglich zu Änderungen bei den Reisezeiten der FFE auf den linken Fahrstreifen.

Hier wird die Abweichung von den Messwerten aus Beobachtung erwartungsgemäß größer, da die Reisezeiten durch eine höhere Anzahl an Bereichen mit reduzierten Geschwindigkeiten eine breitere Streuung aufweisen. Insbesondere die Reisezeiten für die Geradeausströme sind mit Abweichungen zur

Beobachtung für MAD von 8,0 % bis 43,4 % sowie für RMSE von 10,4 % bis 43,5 % noch durchgängig zu hoch. Die hohen Abweichungen für MAD und RMSE sind wie bei der Anpassung im Kalibrierungsschritt B ebenfalls regelmäßig bei den Minima zu finden, während sich die Abweichungen für die Quartile 1, 2 und 3 zwischen 19,0 % und 27,1 % (MAD) respektive zwischen 19,4 % und 27,3 % (RMSE) bewegen. Dies entspricht rund 2,2 s bis 3,0 s zu langen Reisezeiten in der Simulation, trotz prinzipiell zu kurzer Wegelängen.

Die Reisezeiten der Linksabbiegeströme weisen geringere Abweichungen auf als die der Geradeausströme. Die Abweichungen für MAD bewegen sich hierbei zwischen 3,0 % und 18,4 %, die Werte für RMSE zwischen 3,8 % und 23,5 %. Die Abweichungen für die Quartile 1, 2 und 3 bewegen sich zwischen 6,2 % und 14,4 % (MAD) respektive zwischen 6,7 % und 15,2 % (RMSE), was rund 0,9 s bis 2,5 s zu langen Reisezeiten in der Simulation entspricht.

### **Kalibrierungsschritt D:**

Aufgrund der noch zu langen Reisezeiten wird im Kalibrierungsschritt D die *vWunsch* der FFE angepasst. Diese wird lediglich den Langsamfahrbereichen auf dem inneren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn zugeordnet, da die Reisezeiten der FFE auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrten und damit den FFE auf dem äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn ein akzeptables Fehlermaß aufweisen. Die im Rahmen der Initialisierung des Basismodells erstellte *vWunsch* hat lediglich zwei Stützpunkte bei 30 km/h und bei 35 km/h, die relative Häufigkeitsverteilung weist also einen linearen Verlauf auf. Auf Grundlage der im Kalibrierungsschritt C ermittelten Abweichungen werden die beiden Stützpunkte jeweils um 15 % erhöht auf 34 km/h und 40 km/h, die lineare Verteilung bleibt bestehen.

Die Reisezeiten der FFE auf den rechten Fahrstreifen bleiben wie erwartet praktisch unverändert, da sich die geänderte *vWunsch* lediglich auf die FFE der linken Fahrstreifen direkt auswirkt. Bei diesen zeigt die Änderung positive Auswirkungen. Die Reisezeiten der Geradeausströme q2 und q8 nähern sich den Werten der Beobachtung weiter an und weisen nun Abweichungen zur Beobachtung für MAD von 9,0 % bis 18,1 % sowie für RMSE von 9,7 % bis 18,3 % auf. Lediglich die beiden Minima weichen mit 24,0 % (MAD, q2) bzw.

24,1 % (RMSE, q2) sowie 33,0 % (MAD, q8) bzw. 33,2 % (RMSE, q8) stärker ab (vgl. Abbildung 119, Abbildung 120, Tabelle 24 und Tabelle 25). Nach wie vor sind die Reisezeiten noch zu lang.

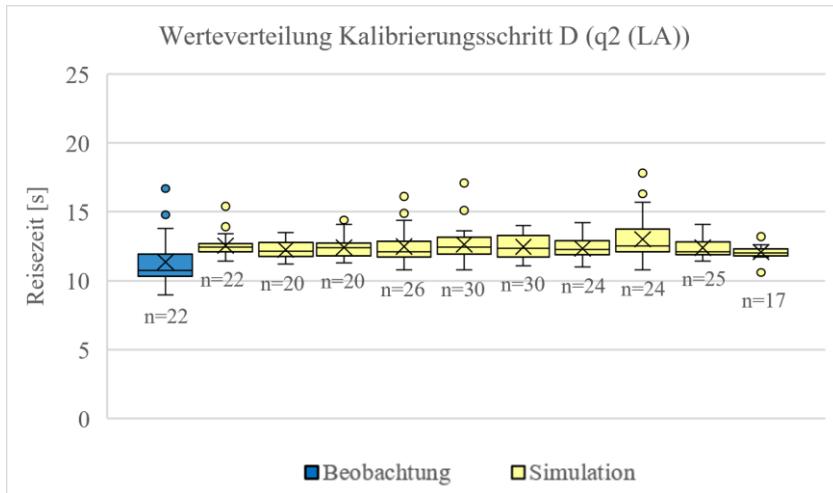


Abbildung 119: Vergleich der Reisezeiten für q2 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt D

Tabelle 24: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (LA) – Kalibrierungsschritt D (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	9,0	2,2	2,2	24,0	24,1
1. Quartil	10,3	1,5	1,5	14,6	14,8
Median	10,8	1,6	1,6	14,4	14,6
3. Quartil	11,9	1,1	1,2	9,0	9,7
Maximum	16,7	1,8	2,0	10,6	12,2
Mittelwert	11,4	1,2	1,2	10,4	10,8

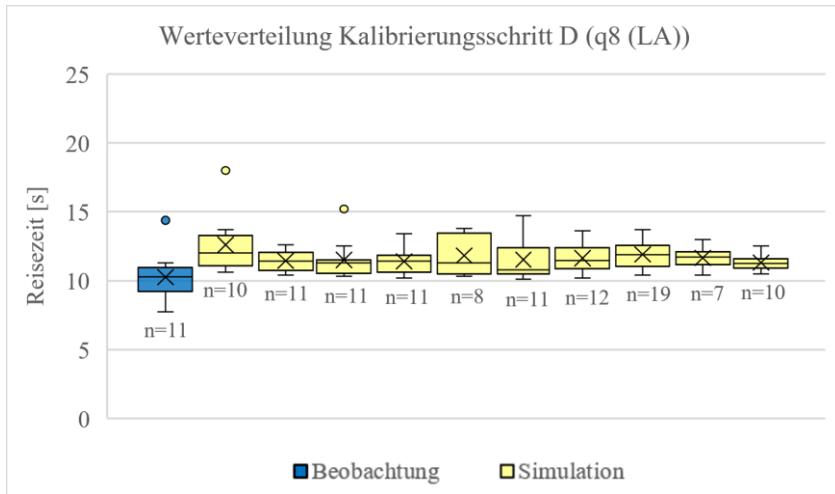


Abbildung 120: Vergleich der Reisezeiten für q8 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt D

Tabelle 25: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (LA) – Kalibrierungsschritt D (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	7,7	2,6	2,6	33,0	33,2
1. Quartil	9,2	1,7	1,7	18,1	18,3
Median	10,3	1,2	1,2	11,3	11,9
3. Quartil	10,9	1,4	1,7	12,9	15,3
Maximum	14,4	2,0	2,7	14,1	18,7
Mittelwert	10,3	1,6	1,7	15,2	16,2

Einer weiteren Anpassung der *vWunsch* sprechen die Werte für die Linksabbieger q1 und q7 entgegen (vgl. Abbildung 121, Abbildung 122, Tabelle 26 und Tabelle 27). Hier sind die Reisezeiten nun tendenziell zu kurz und die Werte erreichen geringe Abweichungen von < 4 % für MAD und < 5 % für

RMSE. Ausnahmen zeigen die jeweiligen Minima mit 5,3 % (MAD, q1) und 6,5 % (RMSE, q1) sowie 6,9 % (MAD, q7) und 7,3 % (RMSE, q7). Auch die Maxima zeigen größere Abweichung von 21,4 % (MAD, q1) und 23,1 % (RMSE, q1) sowie 10,7 % (MAD, q7) und 16,8 % (RMSE, q7). Bei q1 ist zudem eine Abweichung von 21,4 % (MAD) bzw. 22,1 % (RMSE) beim 3. Quartil zu beobachten. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass für q1 lediglich fünf Fahrzeuge ausgewertet werden. In der Konsequenz kommt jedem einzelnen Fahrzeug in der Auswertung eine sehr hohe Bedeutung zu, sodass pro statistischem Kennwert lediglich ein Fahrzeug enthalten ist. Dies kann zu einer Überbewertung einzelner Messwerte führen, weshalb auf eine Anpassung weiterer Parameter in der Simulation zur Abbildung des breiteren IQR verzichtet wird.

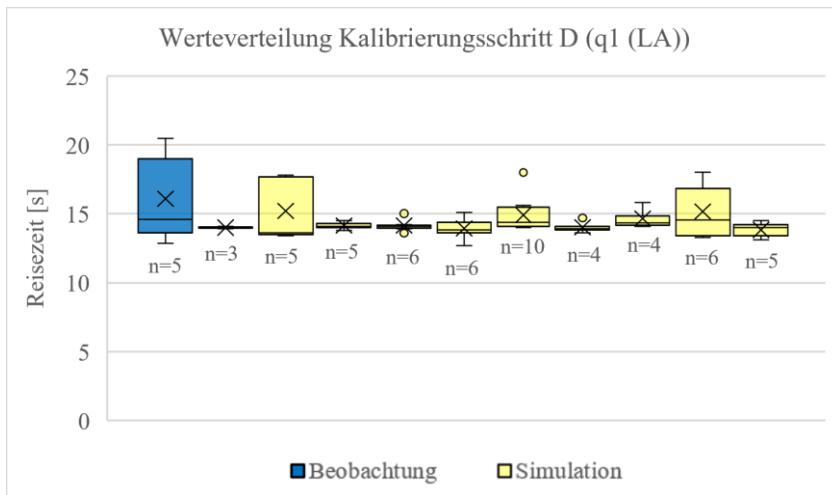


Abbildung 121: Vergleich der Reisezeiten für q1 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt D

Tabelle 26: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q1 (LA) – Kalibrierungsschritt D (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	12,9	0,7	0,8	5,3	6,5
1. Quartil	13,6	0,5	0,6	3,3	4,1
Median	14,6	0,4	0,6	3,0	3,9
3. Quartil	19,0	4,1	4,2	21,4	22,1
Maximum	20,5	4,4	4,7	21,4	23,1
Mittelwert	16,1	1,6	1,7	9,7	10,4

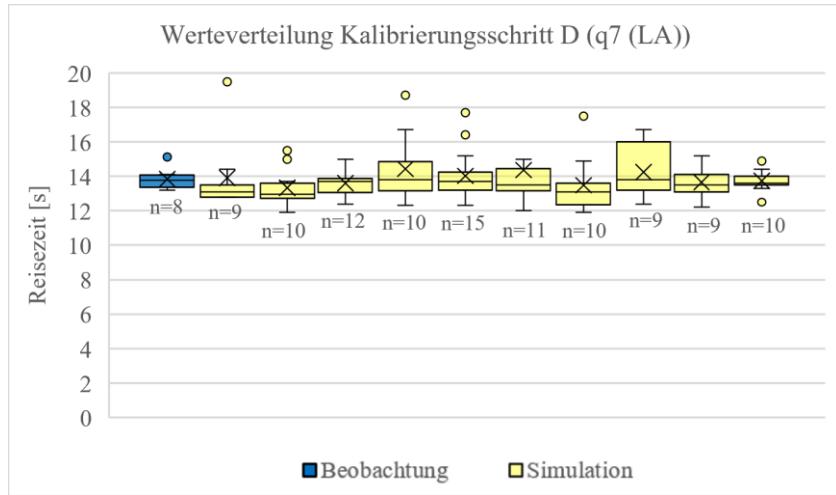


Abbildung 122: Vergleich der Reisezeiten für q7 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt D

Tabelle 27: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q7 (LA) – Kalibrierungsschritt D (100 Simulationsläufe)

Statis-tischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	13,2	0,9	1,0	6,9	7,3
1. Quartil	13,4	0,5	0,6	3,7	4,3
Median	13,8	0,5	0,6	3,4	4,2
3. Quartil	14,1	0,5	0,9	3,8	6,1
Maximum	15,1	1,6	2,5	10,7	16,8
Mittelwert	13,8	0,5	0,6	3,5	4,3

### **Kalibrierungsschritt E:**

Eine Optimierung der Reisezeiten der Geradeausströme erfolgt durch eine weitere Anpassung der  $vWunsch$ , wobei eine starke negative Beeinflussung der Reisezeiten der Linksabbiegeströme vermieden werden soll. Die Werte der beiden Stützpunkte werden jeweils um 5 % erhöht auf 36 km/h und 42 km/h, die lineare Verteilung verbleibt.

Durch die Anpassung wird eine weitere Verbesserung für die Geradeausströme q2 und q8 erreicht. Hierbei ist jedoch zu beobachten, dass nach wie vor die Minima Abweichungen von rund 20 % (q2) bzw. rund 30 % (q8) aufweisen, während die restlichen Werte maximal 14,8 % (MAD, q8) und 15,1 % (RMSE, q8) abweichen (vgl. Tabelle 28 und Tabelle 29). Alle Abweichungen entsprechen nach wie vor zu langen Reisezeiten.

Tabelle 28: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (LA) – Kalibrierungsschritt E (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	9,0	1,7	1,7	19,2	19,4
1. Quartil	10,3	1,1	1,1	10,5	10,7
Median	10,8	1,1	1,1	10,2	10,4
3. Quartil	11,9	0,6	0,8	5,2	6,4
Maximum	16,7	2,3	2,5	13,7	15,2
Mittelwert	11,4	0,7	0,8	6,5	7,2

Tabelle 29: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (LA) – Kalibrierungsschritt E (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	7,7	2,2	2,3	29,0	29,2
1. Quartil	9,2	1,4	1,4	14,8	15,1
Median	10,3	0,8	0,9	7,7	8,4
3. Quartil	10,9	0,9	1,1	8,0	10,0
Maximum	14,4	1,8	2,3	12,7	15,7
Mittelwert	10,3	1,1	1,2	10,9	11,7

Die Reisezeiten der Linksabbiegeströme zeigen lediglich eine geringfügig größere Abweichung von den Messwerten. Die Reisezeiten werden jedoch zunehmend kürzer, trotz zu langer Wegstrecken (vgl. Tabelle 13). Mit Ausnahme des 3. Quartils und des Maximums bei q1 zeigen jedoch alle Werte eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten (vgl. Tabelle 30 und Tabelle 31).

Tabelle 30: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q1 (LA) – Kalibrierungsschritt E (100 Simulationsläufe)

Statis-tischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	12,9	0,4	0,5	3,2	4,0
1. Quartil	13,6	0,4	0,5	3,1	4,0
Median	14,6	0,9	1,0	6,1	6,8
3. Quartil	19,0	4,7	4,8	24,6	25,2
Maximum	20,5	5,2	5,5	25,5	27,1
Mittelwert	16,10	2,2	2,3	13,6	14,3

Tabelle 31: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q7 (LA) – Kalibrierungsschritt E (100 Simulationsläufe)

Statis-tischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	13,2	1,3	1,3	9,8	10,1
1. Quartil	13,4	0,9	1,0	6,9	7,3
Median	13,8	0,9	1,0	6,6	7,0
3. Quartil	14,1	0,8	0,8	5,3	5,9
Maximum	15,1	1,5	2,0	10,0	12,9
Mittelwert	13,8	0,8	0,9	5,9	6,4

Die weitere Kalibrierung birgt die Schwierigkeiten, dass die Reisezeiten der Geradeausströme kürzer werden müssen, die der Linksabbiegeströme hingegen länger. Hierfür gibt es keinen einheitlichen Parameter, weshalb die weitere Kalibrierung eine ‚Ausmittelung‘ der jeweiligen Fehlermaße zum Ziel haben muss. Für eine weitere Unterteilung der Fahrzeugklassen und Zuordnung verschiedener  $vWunsch$  ist aus der Beobachtung und aufgrund der geringen Stichprobe an Linksabbiegern keine Begründung zu finden und birgt die Gefahr eines sogenannten ‚over-fittings‘, also einer Überanpassung des Modells. [FGSV, 2006a]

### Kalibrierungsschritt F:

Aus Tabelle 28 und Tabelle 29 geht hervor, dass für die Geradeausströme des 1. Quartils der simulierten Reisezeiten eine Anpassung notwendig ist, während die restlichen Werte sich in einem guten Bereich befinden. Darauf begründet wird die *vWunsch* wie in Abbildung 123 angepasst. Zum einen wird die Untergrenze von 36,0 km/h auf 38,5 km/h angehoben, zum anderen wird ein weiterer Stützpunkt bei 0,25 mit einer Wunschgeschwindigkeit von 39,0 km/h eingefügt. Dadurch werden die Geschwindigkeiten für die langsameren FFE verhältnismäßig stärker angehoben als die für die schnelleren FFE.



Abbildung 123: Anpassungen der *vWunsch* im Rahmen des Kalibrierungsschrittes F (links: Kalibrierungsschritt E, rechts: Kalibrierungsschritt F)

Im Ergebnis verbessern sich MAD und RMSE für die Geradeausströme weiter und die Abweichungen zur Beobachtung liegen für das 1., 2. und 3. Quartil unter 14 %, die Mittelwerte bei 4,1 % (MAD, q2) bzw. 5,1 % (RMSE, q2) sowie bei 9,5 % (MAD, q8) bzw. 10,9 % (RMSE, q8) (vgl. Tabelle 32 und Tabelle 33). Die Werte bewegen sich damit mit Ausnahme der Minima in guten Bereichen. Zu berücksichtigen sind hier zudem die in Tabelle 13 aufgezeigten Abweichungen von +4,5 % (q2) und +2,7 % (q8) der in „PTV Vissim“ vorliegenden Längen der Wege verglichen mit den Mittelwerten der Längen der Wege aus der Beobachtung. Daraus resultiert, dass die Reisezeiten in „PTV

Vissim<sup>®</sup> um etwa die gleichen prozentualen Abweichungen zu lange sind, also prinzipiell eine noch bessere Übereinstimmung als vorhanden erzielt wird.

Tabelle 32: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (LA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	9,0	1,6	1,6	18,1	18,2
1. Quartil	10,3	0,9	0,9	8,3	8,4
Median	10,8	0,8	0,8	7,3	7,5
3. Quartil	11,9	0,4	0,6	3,1	5,2
Maximum	16,7	2,4	2,7	14,6	16,3
Mittelwert	11,4	0,5	0,6	4,1	5,1

Tabelle 33: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (LA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	7,7	2,3	2,3	29,1	29,3
1. Quartil	9,2	1,3	1,3	13,6	13,8
Median	10,3	0,6	0,7	6,1	6,9
3. Quartil	10,9	0,7	1,1	6,7	10,0
Maximum	14,4	2,0	2,4	14,0	16,7
Mittelwert	10,3	1,0	1,1	9,5	10,9

Für die Linksabbiegeströme ist dies ebenfalls zu beachten. Die Wegelängen weichen hier um +6,4 % (q1) und +6,2 % (q7) vom Mittelwert der Wegelängen aus der Beobachtung ab. Das heißt, auch diese Reisezeiten sind prinzipiell in der Simulation länger als in der Beobachtung, jedoch zeigen die Werte nach wie vor Abweichungen nach unten (vgl. Tabelle 34 und Tabelle 35). Mit

Ausnahme der Werte für das 3. Quartil und das Maximum des Stroms q1 und Berücksichtigung der o. g. Abweichungen bewegen sich die Werte in einem adäquaten Bereich.

Tabelle 34: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q1 (LA) – Kalibrierschritt F (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	12,9	0,3	0,4	2,7	3,4
1. Quartil	13,6	0,6	0,7	4,4	5,0
Median	14,6	1,2	1,3	8,5	9,1
3. Quartil	19,0	5,1	5,2	27,0	27,6
Maximum	20,5	5,5	5,8	26,8	28,4
Mittelwert	16,1	2,5	2,6	15,7	16,3

Tabelle 35: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q7 (LA) – Kalibrierschritt F (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	13,2	1,4	1,5	10,9	11,1
1. Quartil	13,4	1,1	1,2	8,4	8,6
Median	13,8	1,2	1,2	8,5	8,7
3. Quartil	14,1	1,0	1,1	7,1	7,7
Maximum	15,1	1,7	2,1	11,5	14,0
Mittelwert	13,8	1,0	1,1	7,5	8,0

Eine Überprüfung der Reisezeiten der FFE der rechten Fahrstreifen zeigt, dass sich die Werte nur marginal verändert haben und die Anpassungen an der  $vWunsch$  für die FFE der linken Fahrstreifen keinerlei Auswirkungen auf das Fahrverhalten der FFE der rechten Fahrstreifen haben. Im Ergebnis ergeben

sich die nachfolgend dargestellten Abweichungen (vgl. Tabelle 36 bis Tabelle 39). Zu beachten ist hierbei, dass die prozentualen Werte für die Rechtsabbiegeströme  $q_3$  und  $q_9$  nur bedingt aussagekräftig sind, da aufgrund der sehr kurzen Reisezeiten bereits kleine Abweichungen vom Messwert große prozentuale Fehler ergeben.

Tabelle 36: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für  $q_2$  (RA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)

Statis-tischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	8,8	2,4	2,4	27,0	27,1
1. Quartil	10,6	1,2	1,2	11,1	11,2
Median	11,4	0,8	0,8	7,2	7,4
3. Quartil	12,1	0,5	0,5	4,0	4,2
Maximum	16,4	3,1	3,1	18,9	19,1
Mittelwert	11,6	0,5	0,5	4,5	4,6

Tabelle 37: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für  $q_8$  (RA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)

Statis-tischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	8,9	0,5	0,6	6,1	6,3
1. Quartil	9,7	0,4	0,4	3,7	4,0
Median	10,6	0,3	0,3	2,5	2,8
3. Quartil	11,1	0,5	0,5	4,2	4,4
Maximum	14,8	3,1	3,1	20,7	21,3
Mittelwert	10,8	0,4	0,4	3,6	3,8

Tabelle 38: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q3 (RA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	2,9	0,1	0,1	2,6	3,0
1. Quartil	3,4	0,4	0,4	11,3	11,4
Median	3,7	0,5	0,5	14,7	14,7
3. Quartil	3,9	0,7	0,7	16,9	17,0
Maximum	4,8	1,2	1,2	25,1	25,5
Mittelwert	3,7	0,6	0,6	14,8	14,8

Tabelle 39: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q9 (RA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	2,7	0,3	0,3	12,0	12,2
1. Quartil	3,1	0,6	0,6	17,8	17,9
Median	3,4	0,7	0,7	21,8	21,9
3. Quartil	3,6	0,8	0,8	21,5	21,9
Maximum	4,9	1,6	1,6	32,9	33,2
Mittelwert	3,4	0,7	0,7	20,4	20,5

Eine stichprobenartige Kontrolle der Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten in „QGIS“ zeigt, dass es durch die vorgenommenen Änderungen an den Parametern keine negativen Auswirkungen auf diese Bereiche gegeben hat.

Eine weitere Kalibrierung anhand der Reisezeiten erfolgt nicht, da keine signifikanten Verbesserungen mehr zu erwarten sind. Im Weiteren wird das Einfahrerverhalten der FFE in den Zufahrten kalibriert. Dieses kann losgelöst von den Reisezeitmessungen betrachtet werden und hat demnach keine Auswirkungen auf die durchgeführte Kalibrierung anhand der Reisezeiten.

### **Kalibrierungsschritt G:**

Aufschlüsse über das Einfahrverhalten und weiteres Potenzial zur Kalibrierung geben die maximalen Rückstaulängen in den Zufahrten Z1 und Z3, da die Zufahrten Z2 und Z4 aufgrund des Bildausschnittes der Beobachtung nicht beurteilt werden können. Die maximalen Rückstaulängen sind in „PTV Vissim“ wie folgt definiert: im Rahmen der Knotenauswertung werden alle FFE gewertet, die langsamer als 5 km/h fahren. Fährt ein FFE wieder schneller als 10 km/h, endet der Stauzustand dieser FFE. Die Länge des Staus wird von der Konfliktfläche für wartepflichtige FFE stromaufwärts gemessen (vgl. Abbildung 124). Die Länge bezieht sich dabei auf den Abstand zwischen der Front der ersten FFE in der Warteschlange und dem Heck der letzten FFE in der Warteschlange. Gemäß Definition in „PTV Vissim“ werden für die Länge des Rückstaus alle FFE berücksichtigt, die stromaufwärts den Staubedingungen entsprechen. [PTV Group, 2024]

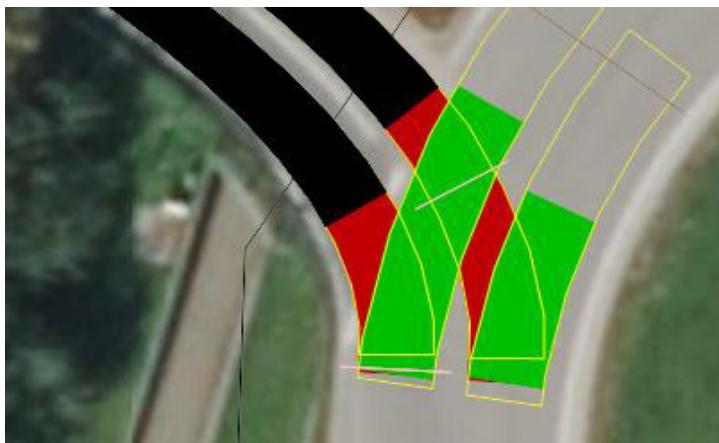


Abbildung 124: Ermittlung der Staulängen für wartepflichtige FFE (Rot = Konfliktfläche der wartepflichtigen FFE, Grün = Konfliktfläche der bevorrechtigten FFE, Schwarz = Visualisierung der Staulänge für den aktuellen Simulationslauf)

Die Festlegungen, die in „PTV Vissim“ getroffen werden, können auf die Rückstaulängen aus der Beobachtung adaptiert werden. Sie sind anhand der

Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten bestimmbar. Für die tatsächliche, in der Beobachtung vorliegende Staulänge muss jedoch die Länge eines Fahrzeuges (rund 5 m gemäß [FGSV, 2020b]) hinzugerechnet werden, da im Rahmen der Erfassung der Trajektorien lediglich die Fronten der Fahrzeuge erfasst wurden.

Für die Zufahrt Z1 ergibt sich für das Intervall 6 von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr eine maximale Rückstaulänge von rund 38,5 m, für die Zufahrt Z3 eine maximale Rückstaulänge von rund 35,5 m. Dies entspricht in beiden Zufahrten rund sechs Fahrzeugen.

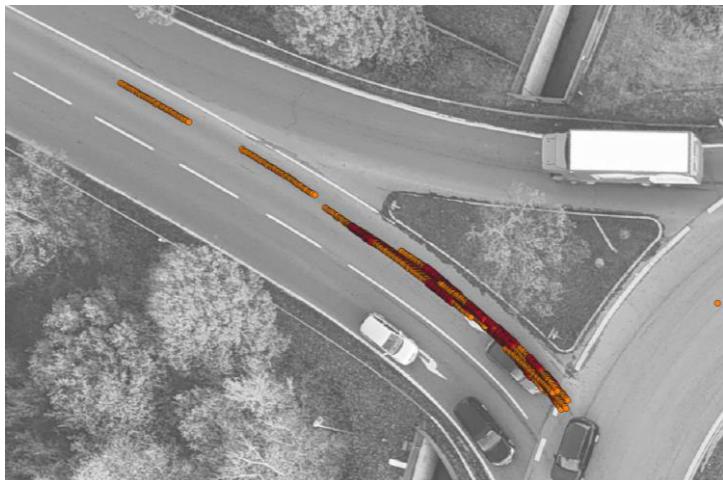


Abbildung 125: Beobachtete, maximale Rückstaulänge in der Zufahrt Z1 für das Intervall 6 von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr

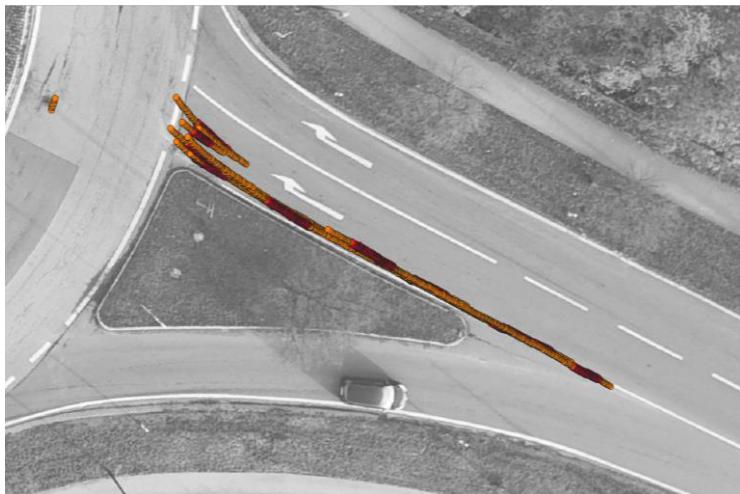


Abbildung 126: Beobachtete, maximale Rückstaulänge in der Zufahrt Z3 für das Intervall 6 von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr

Vorgaben oder Empfehlungen für eine akzeptable Abweichung zwischen den Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation liefert FGSV [2006a] nicht. Anhaltspunkte hierfür bietet jedoch ein Vergleich der Rückstaulängen für die drei Intervalle 6, 7 und 8, da diese eine vergleichbare Verkehrsbelastung aufweisen (vgl. Tabelle 40). Hieraus ist auch ersichtlich, dass trotz vergleichbar hoher Verkehrsbelastung teils große Unterschiede bei den Rückstaulängen auftreten können. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Rückstaulängen auf einer Vielzahl von Zufällen beruht, die nur teilweise erfassbar und in einer Simulation abbildbar sind. So hängen die Rückstaulängen neben der messbaren Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn unter anderem von der zeitlichen Verteilung der Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn über das betrachtete Intervall, aber auch von der Ankunftsverteilung der Fahrzeuge in den Zufahrten ab. Generell lassen sich diese beiden Parameter ebenfalls erfassen und in gewissem Maße in die Simulation einpflegen, jedoch ist auch hier zu beachten, dass dies zu dem bereits oben angesprochenen „over-fitting“ führen kann. Um einer Pseudo-Genauigkeit vorzubeugen, wird die Kalibrierung nicht anhand der Rückstaulängen durchgeführt, sondern diese werden in die Anzahl an

Fahrzeugen umgerechnet. Zur Umrechnung in die Anzahl an Fahrzeuge dient die Länge eines Fahrzeuges plus dessen Abstand zum Vorderfahrzeug, in Summe werden 6,0 m angesetzt. Daraus ergeben sich für ähnlich hohe Gesamtverkehrsstärken Rückstaulängen zwischen zwei und sechs Fahrzeugen (vgl. Tabelle 40), als Mittelwert je Zufahrt also rund fünf Fahrzeuge. Hierbei ergibt sich für die Zufahrt Z1 eine Standardabweichung von 1,9 Fahrzeugen und für die Zufahrt Z3 von 1,3 Fahrzeugen. Auf dieser Basis wird ein akzeptables Fehlermaß von bis zu 2 Fahrzeugen festgelegt.

Tabelle 40: Vergleich der maximalen Rückstaulängen der Intervalle 6, 7 und 8

	Intervall		
	6	7	8
Z1 Rückstaulänge [m]	38,5	36,5	11,0
Z1 Anzahl Fahrzeuge	6	6	2
Z3 Rückstaulänge [m]	33,5	31,0	18,5
Z3 Anzahl Fahrzeuge	6	5	3

Zur Beurteilung der Abweichung zwischen Beobachtung und Simulation wird der Mittelwert des Attributs ‚Staulänge (Maximum)‘ (*StauLngmax*) aus den 100 Simulationsläufen genutzt. Mit den Einstellungen aus Kalibrierungsschritt F ergeben sich die in Tabelle 41 und Tabelle 42 dargestellten Werte.

Tabelle 41: Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z1, Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)

	Zufahrt Z1		
	Beobachtung	MW Sim.	StdAbw Sim.
StauLngMax [m]	38,5	27,4	13,9
Anzahl Fahrzeuge	6	5	2
Abweichung [Fz]	-	-1	-

Tabelle 42: Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z3, Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)

	Zufahrt Z3		
	Beobachtung	MW Sim.	StdAbw Sim.
StauLngMax [m]	33,5	16,9	7,4
Anzahl Fahrzeuge	6	3	1
Abweichung [Fz]	-	-3	-

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass die FFE in der Simulation mit den derzeitigen Einstellungen zu zügig einfahren und tendenziell länger warten müssten, also mehr Zeitlücken ablehnen müssen. Hierfür wird in einem ersten Schritt das Attribut „*FaktSichAbst*“ (Faktor Sicherheitsabstand) der Konfliktflächen für die FFE der linken Fahrstreifen der Zufahrten vom Standardwert 1,0 auf den Wert 1,5 erhöht. Dies erhöht den „... *Mindestabstand, den ein Fahrzeug des wartepliktigen Stroms einhalten muss, wenn es sich vollständig innerhalb der Konfliktfläche vom Typ Einmündung befindet*“ [PTV Group, 2024]. Dies ist vergleichbar mit der Grenzzeitlücke und berechnet sich über dem Wunschsicherheitsabstand der FFE aus dem Fahrzeugfolgemodell.

Durch die Anpassung nähern sich die Mittelwerte der maximalen Rückstaulänge der beiden Zufahrten langsam der Beobachtung an (vgl. Tabelle 41 und Tabelle 42), jedoch weisen beide noch zu große Abweichungen auf.

Tabelle 43: Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z1, Kalibrierungsschritt G (100 Simulationsläufe)

	Zufahrt Z1		
	Beobachtung	MW Sim.	StdAbw Sim.
StauLngMax [m]	38,5	28,8	14,1
Anzahl Fahrzeuge	6	5	2
Abweichung [Fz]	-	-1	-

Tabelle 44: Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z3, Kalibrierungsschritt G (100 Simulationsläufe)

	Zufahrt Z3		
	Beobachtung	MW Sim.	StdAbw Sim.
StauLngMax [m]	33,5	17,1	7,6
Anzahl Fahrzeuge	6	3	1
Abweichung [Fz]	-	-3	-

**Kalibrierungsschritt H:**

Zur weiteren Angleichung erfolgt die Erhöhung der Mindestzeitlücke ‚Lücke vorn (Standard)‘ (*LüVornStd*) von 0,2 s auf 0,5 s. Ist die gemeinsame Konfliktfläche von einer bevorrechtigten FFE belegt, so entspricht der Wert der Zeit, die die vorfahrtgewährende FFE zusätzlich berücksichtigt, um auf die gemeinsame Konfliktfläche einzufahren, bis die bevorrechtigte FFE diese verlassen hat. Dies bewirkt, dass die FFE etwas zögerlicher einfahren als bislang und resultiert in einer Verlängerung der maximalen Staulängen um rund 17 % (vgl. Tabelle 45 und Tabelle 46). Die Werte für die Zufahrt Z1 nähern sich dadurch der Beobachtung weiter an, jedoch ist lediglich eine geringfügige Annäherung der Staulängen für Z3 an die Länge aus der Beobachtung zu erkennen.

Tabelle 45: Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z1, Kalibrierungsschritt H (100 Simulationsläufe)

	Zufahrt Z1		
	Beobachtung	MW Sim.	StdAbw Sim.
StauLngMax [m]	38,5	33,8	16,6
Anzahl Fahrzeuge	6	6	3
Abweichung [Fz]	-	0	-

Tabelle 46: Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z3, Kalibrierungsschritt H (100 Simulationsläufe)

	Zufahrt Z3		
	Beobachtung	MW Sim.	StdAbw Sim.
StauLngMax [m]	33,5	20,1	12,8
Anzahl Fahrzeuge	6	3	2
Abweichung [Fz]	-	-3	-

### **Kalibrierungsschritt I:**

Eine Erhöhung der Mindestzeitlücke ‚Lücke hinten (Standard)‘ (*LüHintStd*) von 0,2 s auf 0,4 s bewirkt eine weitere Erhöhung der Rückstaulängen (vgl. Tabelle 47 und Tabelle 48).

Tabelle 47: Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z1, Kalibrierungsschritt I (100 Simulationsläufe)

	Zufahrt Z1		
	Beobachtung	MW Sim.	StdAbw Sim.
StauLngMax [m]	38,5	38,3	19,0
Anzahl Fahrzeuge	6	6	3
Abweichung [Fz]	-	0	-

Tabelle 48: Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z3, Kalibrierungsschritt I (100 Simulationsläufe)

	Zufahrt Z3		
	Beobachtung	MW Sim.	StdAbw Sim.
StauLngMax [m]	33,5	20,6	11,6
Anzahl Fahrzeuge	6	3	2
Abweichung [Fz]	-	-3	-

Eine weitere Anpassung der Attribute der Konfliktflächen führt lediglich zu einer weiteren Erhöhung der Staulängen in der Zufahrt Z1 und einer langsamen

Zunahme der Staulängen in der Zufahrt Z3, zudem erhöhen sich die Werte der Standardabweichung zunehmend. Da es keine Anhaltspunkte aus der Beobachtung für ein anderes Einfahrerverhalten der FFE aus Zufahrt Z3 gegenüber den FFE aus Zufahrt Z1 gibt, werden die Attribute einheitlich für alle Konfliktflächen für die FFE der linken Fahrstreifen beibehalten. Eine weitere Anpassung der Attribute wird somit nicht mehr vorgenommen.

Für die beiden Zufahrten Z2 und Z4 ergeben sich die in Tabelle 49 dargestellten Werte für die maximalen Rückstaulängen aus der Simulation.

Tabelle 49: Werte für StauLngMax für die FFE der linken Fahrstreifen (100 Simulationsläufe)

	Mittelwert	Standardabweichung
Z2	20,6 m	10,5 m
Z4	112,3 m	76,3 m

Die oben diskutierten Attribute der Konfliktflächen sind für die FFE der rechten Fahrstreifen wie folgt gewählt:

- $LüVornStd = 0,2$  s
- $LüHintStd = 0,2$  s
- $FaktSichAbst = 1,0$

Daraus ergeben sich die in Tabelle 50 dargestellten Werte für die maximalen Rückstaulängen. Diese lassen sich wie bereits in Kapitel 7.4.2 erläutert jedoch nicht beurteilen und sind hier lediglich der Vollständigkeit halber aufgelistet.

Tabelle 50: Werte für StauLngMax für die FFE der rechten Fahrstreifen (100 Simulationsläufe)

	Mittelwert	Standardabweichung
Z1	80,0 m	48,4 m
Z2	29,7 m	18,7 m
Z3	29,8 m	17,1 m
Z4	113,7 m	75,1 m

Zur abschließenden Einschätzung der Kalibrierungsgüte dient die Anzahl der Fahrzeuge, die im vorgegebenen Intervall den Knotenpunkt passieren. Werden dabei zu wenige Fahrzeuge gemessen, so ist der Verkehrsfluss als schlechter einzustufen als in der Beobachtung. Werden mehr Fahrzeuge gemessen, so ist der Verkehrsfluss demnach als besser einzustufen als in der Beobachtung. Zudem sind die Werte der Fahrzeugzuflüsse in beiden Fällen noch einmal überprüft worden. Der Mittelwert für die Anzahl an Fahrzeugen, die im Intervall den Knotenpunkt passieren, beträgt 284 Fz (vgl. Tabelle 51) bei einer Standardabweichung von 13 Fz. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 4,6 % zur Anzahl der Fahrzeuge aus der Beobachtung und ist nach FGSV [2006a] im Bereich des akzeptablen Fehlermaßes. Die Höhe der Abweichungen bezogen auf die einzelnen Zufahrten und deren Fahrstreifen ist aus Tabelle 52 ersichtlich.

Tabelle 51: Abweichung der Anzahl an Fahrzeugen zwischen Simulation (100 Simulationsläufe) und Beobachtung (Gesamtverkehrsstärke)

Simulation (Mittelwert) [Fz]	Beobachtung [Fz]	Simulation vs. Beobachtung [Fz]	Simulation vs. Beobachtung [%]
284	287	-3	-1,0

Tabelle 52: Abweichung der Anzahl an Fahrzeugen zwischen Simulation (100 Simulationsläufe) und Beobachtung (einzelne Zufahrten)

	Simulation (Mittelwert) [Fz]	Beobachtung [Fz]	Simulation vs. Beobachtung [Fz]	Simulation vs. Beobachtung [%]
Z1R	61	61	0	0,0
Z1L	27	28	-1	-3,6
$\sum Z1$	88	89	-1	-1,1
Z2R	35	35	0	0,0
Z2L	19	19	0	0,0
$\sum Z2$	54	54	0	0,0
Z3R	50	50	0	0,0
Z3L	23	23	0	0,0
$\sum Z3$	73	73	0	0,0
Z4R	59	61	-2	-3,3
Z4L	10	10	0	0,0
$\sum Z4$	69	71	-2	-2,8

Aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten wird die Kalibrierung somit als abgeschlossen eingestuft. Im nächsten Schritt müssen die vorgenommenen Einstellungen validiert werden.

#### 7.4.5 Durchführung der Validierung

Die Validierung erfolgt anhand des Intervalls 7 (Zeitraum von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr). Dieses weist eine um rund 6 % höhere Gesamtverkehrsbelastung auf als das Intervall 6, welches zur Kalibrierung genutzt wurde. Im Rahmen des Validierungsprozesses wird die Gesamtverkehrsnachfrage des Intervalls sowie deren Verteilung auf die einzelnen Verkehrsströme in „PTV Vis-sim“ abgebildet, alle im Rahmen der Kalibrierung ermittelten Attribute werden beibehalten. Grundlage für die Bewertung der Simulationsergebnisse sind 100 Simulationsläufe, analog zum Vorgehen im Rahmen der Kalibrierung. Das Fehlermaß im Rahmen der Validierung kann dabei größer ausfallen als im Rahmen der Kalibrierung. [FGSV, 2006a]

## Überprüfung der Reisezeiten

### RA – Geradeaus (q2 und q8)

Die Reisezeiten für q2 zeigen durchweg geringere Abweichungen zwischen der Beobachtung und der Simulation als im abschließenden Schritt der Kalibrierung (vgl. Tabelle 53). Dabei bleiben die Abweichungen aller Werte für MAD unter 11 %, die Abweichungen aller Werte für RMSE unter 11,4 %. Die Mittelwerte weisen dabei lediglich eine Abweichung von 1,1 % (MAD) bzw. 1,4 % (RMSE) auf. Die sehr gute Übereinstimmung der Reisezeiten zeigt grafisch Abbildung 127.

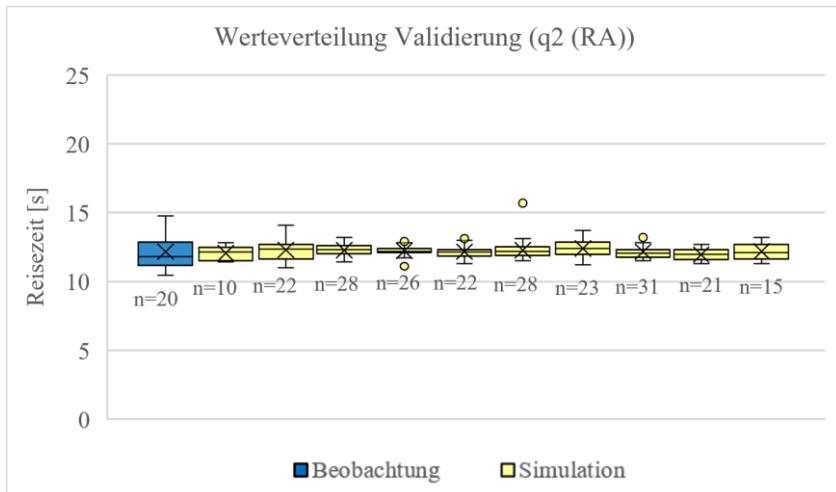


Abbildung 127: Vergleich der Reisezeiten für q2 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung

Tabelle 53: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (RA) – Validierung (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	10,4	0,8	0,9	8,0	8,2
1. Quartil	11,2	0,6	0,6	5,3	5,6
Median	11,8	0,4	0,4	3,0	3,3
3. Quartil	12,8	0,3	0,4	2,6	2,9
Maximum	14,8	1,6	1,7	11,0	11,4
Mittelwert	12,2	0,1	0,2	1,1	0,2

Der Vergleich der Reisezeiten für q8 zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit Werten in ähnlicher Größenordnung wie bei der Kalibrierung. Positiv zu bewerten ist dabei die größere Homogenität der Werte, was darauf zurückzuführen ist, dass die gemessenen Werte aus der Beobachtung des Intervalls 7 homogener sind als beim Intervall 6. Die für die Reisezeiten relevanten Attribute für die Geradeausströme der FFE auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrten (Wunschgeschwindigkeitsverteilungen, Parameter des Folgemodells etc.) gelten damit als valide.

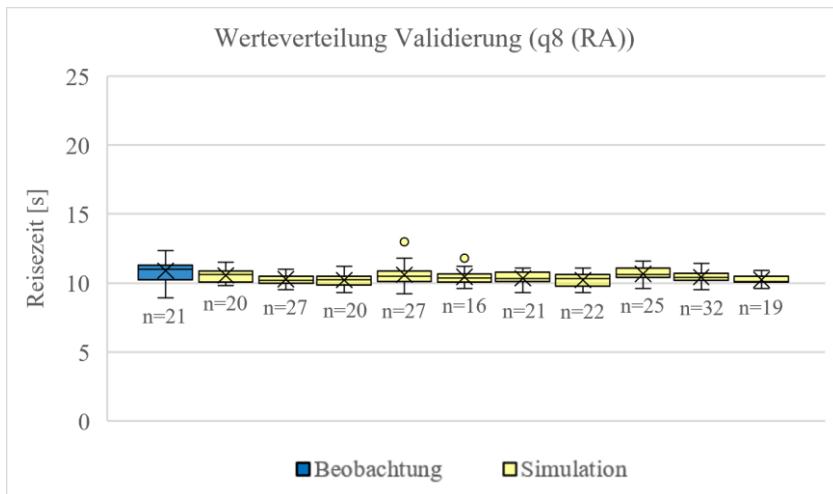


Abbildung 128: Vergleich der Reisezeiten für q8 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung

Tabelle 54: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (RA) – Validierung (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	8,9	0,6	0,6	6,6	6,9
1. Quartil	10,2	0,3	0,3	2,5	2,9
Median	11,0	0,7	0,7	6,3	6,4
3. Quartil	11,3	0,7	0,7	6,3	6,5
Maximum	12,4	1,0	1,1	8,2	8,8
Mittelwert	10,9	0,6	0,6	5,1	5,3

### RA – Rechtsabbieger (q3 und q9)

Wie bereits im Rahmen der Kalibrierung (Kapitel 7.4.4, Kalibrierungsschritt A) erläutert, ist für die Rechtsabbieger bei der Interpretation der

Ergebnisse zu berücksichtigen, dass bei diesen sehr kurze Reisezeiten vorliegen und geringe Abweichungen im Vergleich zu Verkehrsströmen mit längeren Reisezeiten prozentual sehr stark ins Gewicht fallen (vgl. Abbildung 129 und Abbildung 130 sowie Tabelle 55 und Tabelle 56). Es ist festzuhalten, dass die Werte – mit Ausnahme eines Ausreißers im Rahmen der Beobachtung – keine Verschlechterung gegenüber den Werten aus der Kalibrierung mit sich bringen. Eine Aussage zur Validität kann nicht getroffen werden, da auch bereits die im Rahmen der Kalibrierung ermittelten Werte nur qualitativ bewertet werden konnten.

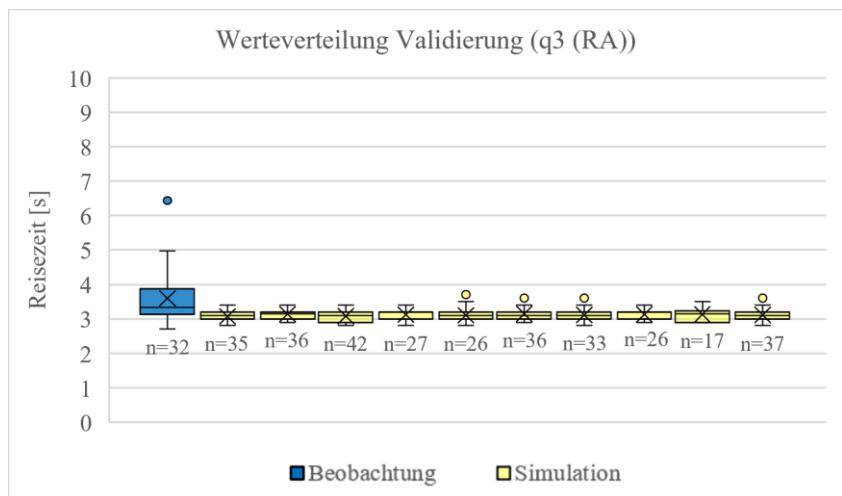


Abbildung 129: Vergleich der Reisezeiten für q3 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung

Tabelle 55: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q3 (RA) – Validierung (100 Simulationsläufe)

Statis-tischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	2,7	0,1	0,1	4,4	4,7
1. Quartil	3,1	0,1	0,1	4,2	4,5
Median	3,3	0,2	0,2	6,4	6,6
3. Quartil	3,9	0,7	0,7	16,8	16,8
Maximum	6,4	2,8	2,9	44,1	44,3
Mittelwert	3,6	0,5	0,5	13,0	13,0

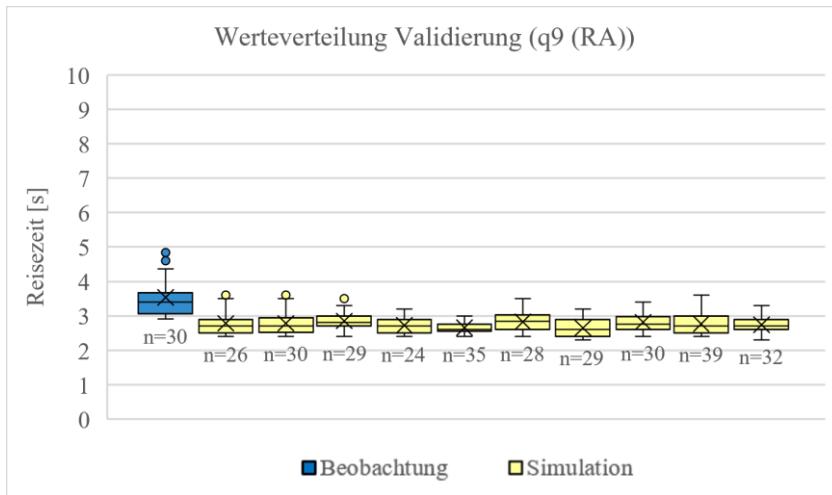


Abbildung 130: Vergleich der Reisezeiten für q9 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung

Tabelle 56: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q9 (RA) – Validierung (100 Simulationsläufe)

Statis-tischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	2,9	0,5	0,5	18,3	18,4
1. Quartil	3,1	0,5	0,5	16,8	16,9
Median	3,4	0,7	0,7	19,9	20,1
3. Quartil	3,7	0,7	0,7	19,4	19,6
Maximum	5,0	1,6	1,6	31,1	31,4
Mittelwert	3,5	0,8	0,8	21,3	21,4

### LA – Geradeaus (q2 und q8)

Die Reisezeiten der Geradeausströme zeigen eine Verringerung der Abweichungen gegenüber den Werten aus der Kalibrierung. Für q2 erreichen die Werte eine Abweichung von < 14 % und bewegen sich damit in einem guten Bereich (vgl. Tabelle 57 und Abbildung 131).

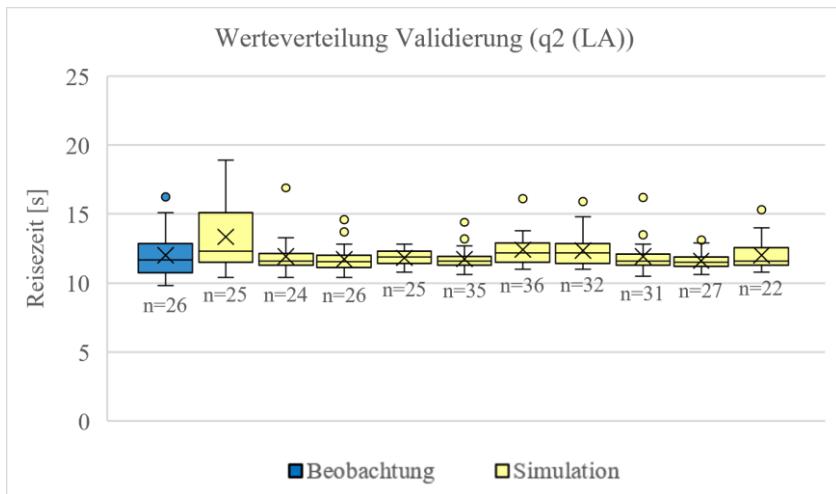


Abbildung 131: Vergleich der Reisezeiten für q2 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Beobachtung sowie 10 Simulationsläufen – Validierung

Tabelle 57: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (LA) – Validierung (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{obs}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	9,8	0,8	0,8	8,1	8,4
1. Quartil	10,8	0,5	0,5	4,7	4,9
Median	11,7	0,2	0,3	1,8	2,4
3. Quartil	12,9	0,7	0,8	5,3	6,3
Maximum	16,3	1,9	2,2	11,7	13,6
Mittelwert	12,0	0,3	0,4	2,6	3,5

Mit Ausnahme des Minimums und des Maximums erreichen auch die Werte für q8 eine Abweichung von < 10 %. Während sich die Abweichungen beim Maximum erhöhen, verringern sich diese beim Minimum. Der Mittelwert zeigt

lediglich Abweichungen von 2,3 % (MAD) bzw. 3,7 % (RMSE) (vgl. Abbildung 132 und Tabelle 58).

Die für die Reisezeiten relevanten Attribute für die Geradeausströme der FFE auf den linken Fahrstreifen der Zufahrten (Wunschgeschwindigkeitsverteilungen, Parameter des Folgemodells, Einstellungen der Querverkehrsstörungen etc.) werden somit ebenfalls als valide eingestuft.

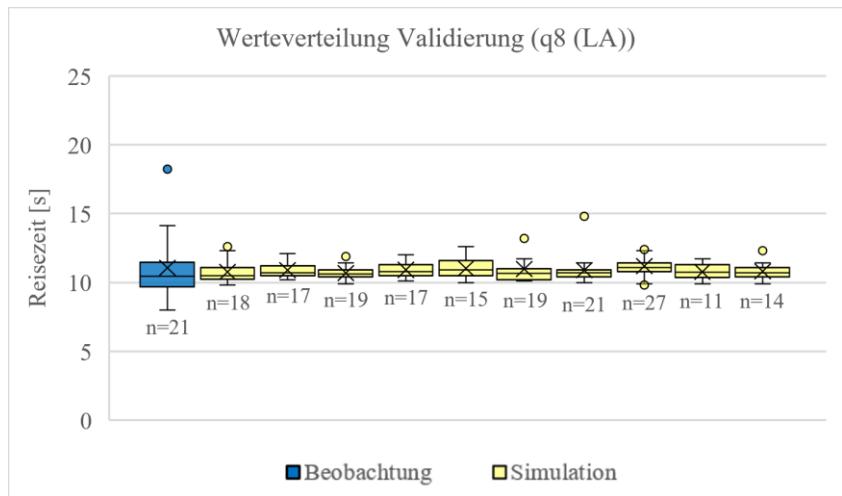


Abbildung 132: Vergleich der Reisezeiten für q8 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung

Tabelle 58: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (LA) – Validierung (100 Simulationsläufe)

Statis-tischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	8,01	1,9	1,9	23,4	23,5
1. Quartil	9,68	0,7	0,7	7,3	7,4
Median	10,44	0,3	0,4	3,0	3,5
3. Quartil	11,48	0,3	0,4	2,9	3,9
Maximum	18,22	5,0	5,2	27,5	28,7
Mittelwert	11,07	0,3	0,4	2,3	3,7

### LA – Linksabbieger (q1 und q7)

Die Anzahl an Fahrzeugen für den Verkehrsstrom q1 beträgt im Intervall 7 lediglich  $n = 3$  und ist damit noch geringer als im Intervall 6. Wie im Rahmen der Kalibrierung festgestellt, sind die Reisezeiten auch hier zu kurz (vgl. Abbildung 133), für die Fehlermaße sind nur Tendenzen festzustellen. Die Abweichung zu den Werten der Beobachtung bewegt sich für alle Werte im Bereich zwischen 16,2 % und 18,5 % (MAD) bzw. im Bereich zwischen 28,5 % und 29,8 % (RMSE). Die Abweichung ist hier größer, da durch die geringe Anzahl an Werten eine starke Streuung der Ergebnisse vorliegt (vgl. Tabelle 59).

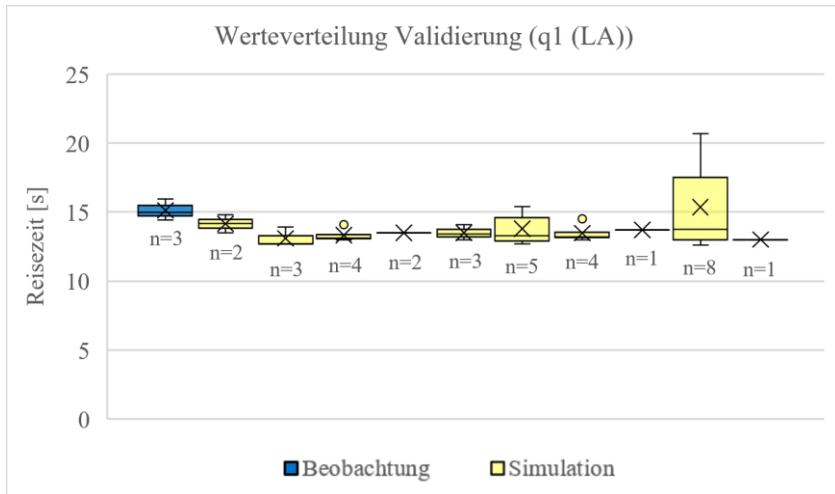


Abbildung 133: Vergleich der Reisezeiten für q1 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung

Tabelle 59: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q1 (LA) – Validierung (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	14,42	2,4	4,1	16,3	28,5
1. Quartil	14,70	2,4	4,2	16,2	28,5
Median	14,98	2,5	4,3	16,4	28,5
3. Quartil	15,47	2,7	4,5	17,2	28,9
Maximum	15,95	3,0	4,8	18,5	29,8
Mittelwert	15,12	2,5	4,3	16,4	28,6

Auch der Verkehrsstrom q7 weist eine sehr geringe Anzahl an Fahrzeugen ( $n = 6$ ) auf, weshalb auch hier die Aussagekraft eingeschränkt ist. Dabei sind die Abweichungen der Minima und der 1. Quartile geringer als im Rahmen der Kalibrierung, bei den restlichen Werten sind jedoch Verschlechterungen zu

verzeichnen (vgl. Abbildung 134 und Tabelle 60). Dennoch ist die Übereinstimmung besser als beim Verkehrsstrom q1. Eine Aussage zur Validität kann bei beiden Verkehrsströmen nicht getroffen werden.

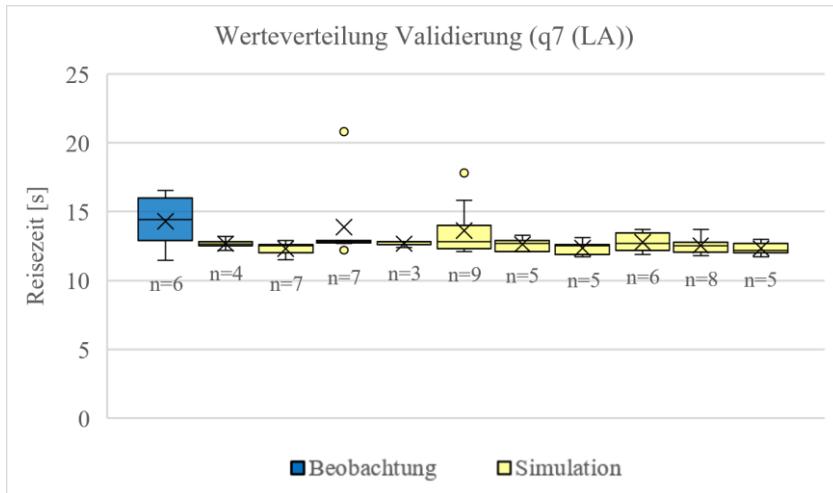


Abbildung 134: Vergleich der Reisezeiten für q7 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung

Tabelle 60: Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q7 (LA) – Validierung (100 Simulationsläufe)

Statistischer Kennwert	Messwert $x_{\text{obs}}$ [s]	MAD [s]	RMSE [s]	Messwert vs. MAD [%]	Messwert vs. RMSE [%]
Minimum	11,48	0,5	0,6	4,1	5,0
1. Quartil	12,90	0,7	0,7	5,1	5,5
Median	14,41	1,8	1,9	12,6	12,9
3. Quartil	16,00	3,0	3,1	18,7	19,2
Maximum	16,52	2,8	3,0	16,7	17,9
Mittelwert	14,29	1,5	1,6	10,7	11,3

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Reisezeiten der jeweiligen Geraudeausströme mit den im Rahmen der Kalibrierung ermittelten Attributen valide in der Simulation abgebildet werden. Für die restlichen Reisezeiten lässt sich lediglich qualitativ festhalten, dass die Werte sich lediglich im Einzelfall verschlechtern, teils sogar verbessern.

### **Überprüfung der Rückstaulängen**

Tabelle 61 zeigt die Gegenüberstellung der maximalen Rückstaulängen auf dem linken Fahrstreifen der Zufahrt Z1. Diese zeigen eine Abweichung nach unten um 8 m, bzw. 1 Fz, die Standardabweichung ist wie in Kapitel 7.4.4 beschrieben realistisch.

Tabelle 61: Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z1 (LA) – Validierung (100 Simulationsläufe)

	Zufahrt Z1		
	Beobachtung	MW Sim.	StdAbw Sim.
StauLngMax [m]	36,5	28,4	14,3
Anzahl Fahrzeuge	6	5	2
Abweichung [Fz]	-	-1	-

Bei Überprüfung der maximalen Rückstaulängen auf dem linken Fahrstreifen der Zufahrt Z3 werden hingegen sehr große Abweichungen zwischen Beobachtung und Simulation festgestellt, vgl. Tabelle 62. Die langen Rückstaulängen resultieren daraus, dass der zweistufige Bereich der Zufahrt lediglich eine Länge von ca. 42 m hat (und damit auch ungefähr dem Bereich des Bildausschnittes der Videos entspricht) und der Rückstau auf dem rechten Fahrstreifen die FFE des linken Fahrstreifens daran hindert, diesen zu erreichen, obwohl dieser nur teilweise belegt ist. Dargestellt ist die Problematik beispielhaft in Abbildung 135. Hier befinden sich vier FFE im Rückstau (Magenta), die aufgrund des Rückstaus der FFE auf dem rechten Fahrstreifen (Cyan) den linken Fahrstreifen nicht erreichen können, deren Position jedoch in die Ermittlung der Staulänge für den linken Fahrstreifen mit eingeht. Dabei ist keine verlässliche Aussage darüber möglich, ob dies auch in der Beobachtung der

Fall ist, da der Bildausschnitt entsprechend begrenzt ist (vgl. Abbildung 135, rot gestrichelte Linie). Eine erneute Sichtung des Videos zeigt, dass der Rückstau auf dem rechten Fahrstreifen im Intervall häufig bis zum Bildrand reicht und die beschriebene Situation nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, sodass ggf. der Messwert aus der Beobachtung fehlerbehaftet sein könnte. Für die Zufahrt Z1 ist dies nahezu auszuschließen, da zum einen die Länge des zweistreifigen Abschnitts rund 100 m beträgt und zum anderen der Rückstau auf dem rechten Fahrstreifen nur selten den Bildrand erreicht, gleichzeitig jedoch stets Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen im Bild zügig ankommen.

Tabelle 62: Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z3 (LA) – Validierung (100 Simulationsläufe)

	Zufahrt Z3		
	Beobachtung	MW Sim.	StdAbw Sim.
StauLngMax [m]	31,0	68,6	74,0
Anzahl Fahrzeuge	5	11	12
Abweichung [Fz]	-	+6	-



Abbildung 135: Beeinflussung der Rückstaulängen der FFE auf dem linken Fahrstreifen der Zufahrt durch FFE des rechten Fahrstreifens

Um den Einfluss des Rückstaus auf dem rechten Fahrstreifen zu eliminieren, wird zur Überprüfung die Verkehrsbelastung für die Gesamtzahl der FFE auf dem rechten Fahrstreifen auf 0 Fz/h reduziert. Die für das Einfahren der FFE des linken Fahrstreifens relevanten Verkehrsströme und damit die Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn im Bereich der Zufahrt Z3 bleiben unverändert. Damit ist die Messung der Rückstaulänge auf dem linken Fahrstreifen unbeeinflusst von FFE auf dem rechten Fahrstreifen und beträgt nun 38,2 m (Mittelwert aus 100 Simulationsläufen), vgl. Tabelle 63. Dieser Wert ist als ausreichend genau einzustufen.

Tabelle 63: Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z3 (LA) ohne Einfluss der FFE des rechten Fahrstreifens – Validierung (100 Simulationsläufe)

	Zufahrt Z3		
	Beobachtung	MW Sim.	StdAbw Sim.
StauLngMax [m]	31,0	38,2	21,8
Anzahl Fahrzeuge	5	6	4
Abweichung [Fz]	-	+1	-

### Überprüfung der Anzahl Fahrzeuge

Zur weiteren Einschätzung der Validierungsgüte dient die Anzahl der ‚Fahrzeuge (gesamt)‘ sowie in den einzelnen Zufahrten. Wie im Rahmen der Kalibrierung stimmt die Gesamtzahl der FFE in der Simulation mit der Anzahl der Fahrzeuge in der Beobachtung praktisch überein. Die Abweichung beträgt lediglich -2 Fz, was lediglich -0,7 % entspricht (vgl. Tabelle 64). Die Ergebnisse sind damit praktisch identisch. Dies trifft auch auf die einzelnen Zufahrten zu (vgl. Tabelle 65). Die Standardabweichung der Simulation beträgt 5,0 % und entspricht einer guten Übereinstimmung.

Tabelle 64: Abweichung der Anzahl an Fahrzeugen zwischen Simulation (100 Simulationsläufe) und Beobachtung (Gesamtverkehrsstärke) im Zuge der Validierung

Simulation (Mittelwert) [Fz]	Beobachtung [Fz]	Simulation vs. Beobachtung [Fz]	Simulation vs. Beobachtung [%]
301	303	-2	-0,7

Tabelle 65: Abweichung der Anzahl an Fahrzeugen zwischen Simulation (100 Simulationsläufe) und Beobachtung (einzelne Zufahrten) im Zuge der Validierung

	Simulation (Mittelwert) [Fz]	Beobachtung [Fz]	Simulation vs. Beobachtung [Fz]	Simulation vs. Beobachtung [%]
Z1R	57	56	+1	+1,8
Z1L	29	29	0	0,0
$\sum Z1$	86	85	+1	+1,2
Z2R	63	63	0	0,0
Z2L	23	23	0	0,0
$\sum Z2$	86	86	0	0,0
Z3R	54	54	0	0,0
Z3L	27	27	0	0,0
$\sum Z3$	81	81	0	0,0
Z4R	34	36	-2	-5,6
Z4L	14	15	-1	-6,7
$\sum Z4$	48	51	-3	-5,9

## 7.5 Fazit

Während die Werte der Reisezeiten und die Anzahl der Fahrzeuge valide sind, sind die Rückstaulängen in den Zufahrten nur bedingt beurteilbar. Damit liegt final ein Modell vor, dessen Aussagekraft in Teilen eingeschränkt ist. Demnach können die Auswirkungen der verschiedenen Fahrweisen nur qualitativ miteinander verglichen werden.

Die im Rahmen der Validierung aufgezeigte Problematik bzgl. der ggf. nicht ausreichenden Längen der Aufstellflächen/zweistreifigen Abschnitte der Zufahrten erfordert eine Nachjustierung des Modells im Rahmen des Simulationsexperiments. Die tatsächlichen Längen der zweistreifigen Abschnitte werden in der Regel rechnerisch dimensioniert, bilden idealerweise also den Bedarf bei vorherrschender oder prognostizierter Verkehrs nachfrage ab [FGSV, 2015b]. Bei sich ändernden Vorgaben zur Nutzung der Fahrstreifen hat dies unweigerlich Auswirkungen auf die erforderliche Länge der

zweistreifigen Abschnitte. Da diese Auswirkungen nur bedingt bezifferbar sind, werden die zweistreifigen Abschnitte für die Zufahrten Z1, Z2 und Z3 auf eine Länge von  $\geq 400$  m verlängert, sodass Aussagen für jeden Fahrstreifen separat gemacht werden können.

Eine Überprüfung der Reisezeiten des modifizierten Modells bestätigt, dass sich durch die Anpassung lediglich Änderungen im Bereich zufallsbasierter Abweichungen ergeben haben und das Modell weiterhin wie oben dargestellt zu interpretieren ist.

## 8 Simulationsexperiment

Das abschließende Simulationsexperiment soll zum einen die Auswirkungen der Anwendung der beiden Fahrweisen 1 und 2 in der Praxis anhand des ‚Pul-lacher Kreisels‘ aufzeigen (Kapitel 8.1 und 8.2). Zur Interpretation der Ergebnisse werden die Attribute ‚Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert)‘ (*VehDelay*) und ‚Staulänge (Maximum)‘ (*StauLngMax*) ausgewertet. Der in Kapitel 7.4 und 7.4.5 genutzte Wert der ‚Reisezeit‘ diente ausschließlich der Kalibrierung sowie der Validierung und erlaubt keine direkten Rückschlüsse auf die Qualität des Verkehrsablaufs. Zur Überprüfung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird zudem die Anzahl der Fahrzeuge ermittelt, die den Knotenpunkt im Intervall komplett passiert haben. Zur einfacheren Handhabbarkeit wird die Simulationsdauer eines Simulationslaufs auf 5 min festgelegt. Die in der Realität erhobene Fahrweise wird nachfolgend als ‚Fahrweise 0‘ deklariert und spiegelt die Verkehrsnachfrage des Intervalls 7 wider.

Zum anderen soll analog zu den Berechnungen in Kapitel 4.4 und 4.5 theoretisch aufgezeigt werden, wie sich die Kapazitäten unter Veränderung der Verteilung der Verkehrsbelastung ändern (Kapitel 8.3). Hierfür wird die Verkehrsbelastung sukzessive gesteigert, bis die Kapazität erreicht ist.

### 8.1 Änderung der Verkehrsqualität bei Anwendung unterschiedlicher Fahrweisen

Zur Beurteilung, wie sich die Verkehrsqualität durch Anwendung der Fahrweisen 1 und 2 gegenüber der Fahrweise 0 verändert wird die vorhandene Verkehrsnachfrage auf Basis der erhobenen Verkehrsströme und der geltenden Regelungen, die den Fahrweisen zugrunde liegen, berechnet und halbautomatisiert an ‚PTV Vissim‘ übergeben. Die Zusammensetzung der einzelnen Fahrzeugzuflüsse und deren Verteilung auf die Routen ist Anhang 5 zu entnehmen.

Abbildung 136 zeigt die Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrten und der Kreisfahrbahn auf Höhe der Zufahrten nach Fahrweisen. Für die einstreifige Zufahrt entspricht dies einer Gruppierung von Verkehrsströmen. Während die Anzahl der FFE in den Zufahrten Z1, Z3 und Z4 im Rahmen der zufallsbasierten Abweichung bleibt, weist Zufahrt Z2 einen signifikanten Rückgang der Gesamtzahl bei Fahrweise 2 um rund 16 % auf. Dies wirkt sich auch direkt auf die Zahl der Fahrzeuge am Querschnitt K3 aus und auch noch in abgeschwächter Weise auf den Querschnitt K4. Mit Bezug zu den ermittelten „*StauLngMax*“ (Abbildung 137) zeigt sich, dass diese für die Zufahrt Z2 auf dem linken Fahrstreifen überproportional steigt gegenüber den ermittelten Rückstaulängen der beiden anderen Fahrweisen, ein ähnliches Bild zeigen die „*VehDelay*“ (Abbildung 138). Dies lässt darauf schließen, dass nicht mehr alle FFE einfahren können. Des Weiteren ist zu erkennen, dass für Z2 die Fahrweise 0 der Fahrweise 1 annähernd gleicht, was sich ebenfalls in vergleichbaren Werten für „*StauLngMax*“ und „*VehDelay*“ zeigt.

Für die beiden anderen zweistufigen Zufahrten Z1 und Z3 ist festzuhalten, dass in der Beobachtung der linke Fahrstreifen deutlich häufiger genutzt wird als bei Befolgung von Fahrweise 1. Dies resultiert darin, dass die Werte für „*StauLngMax*“ bei Anwendung der Fahrweise 1 für die FFE der rechten Fahrstreifen stark steigen und für die FFE der linken Fahrstreifen stark sinken. Es ist jedoch auch zu beobachten, dass damit geringere Werte für „*VehDelay*“ für die FFE der linken Fahrstreifen einhergehen, was in Relation zur Staulänge jedoch dafür spricht, dass die Wartezeiten auf den linken Fahrstreifen der Zufahrten höher sind als die auf den rechten. Dies zeigt sich auch an den größeren Werten für „*VehDelay*“ der FFE der rechten Fahrstreifen, die jedoch eher der größeren Anzahl an FFE geschuldet sind.

Für die einstreifige Zufahrt Z4 zeigt sich, dass die real beobachtete Fahrweise 0 prinzipiell der Fahrweise 1 entspricht. Eine Änderung der Fahrweise wirkt sich dabei lediglich auf die Möglichkeit in den Kreisverkehr einzufahren und auf die Belegung der Kreisfahrbahn stromabwärts aus. Dass dies dennoch einen Einfluss hat, zeigen die Werte für „*StauLngMax*“ und „*VehDelay*“, die mit Änderung der Fahrweisen ansteigen.

Für alle zweistufigen Zufahrten ist festzuhalten, dass sich bei Anwendung von Fahrweise 2 die Werte für ‚*VehDelay*‘  $\leq 1,0$  s ergeben und ‚*StauLngMax*‘ weniger als 1 Fz beträgt. Dies lässt darauf schließen, dass FFE auf dem rechten Fahrstreifen in der Regel ohne Halt einfahren können.



Abbildung 136: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrten und der Kreisfahrbahn nach Fahrweise

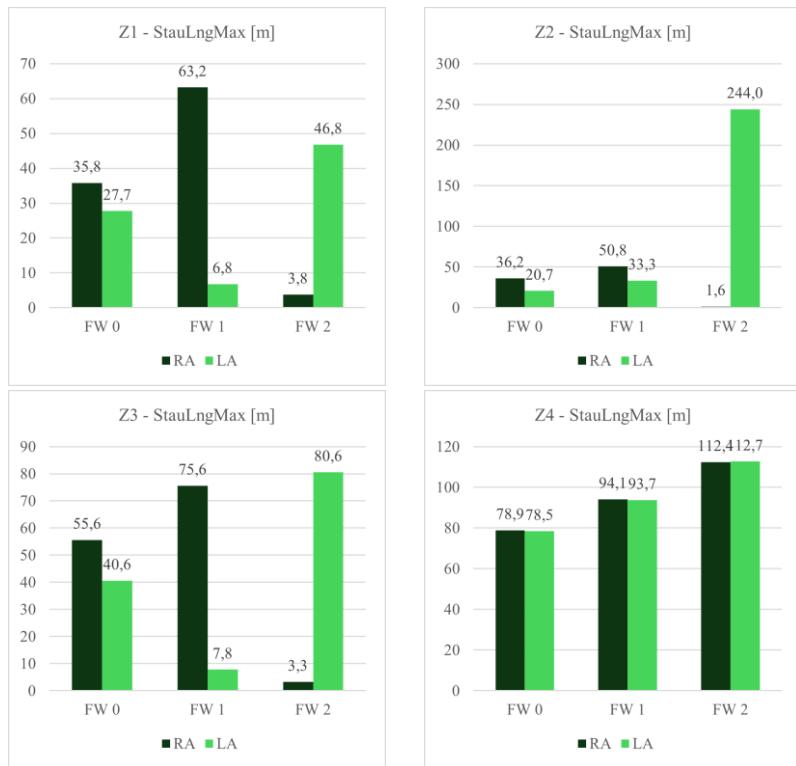


Abbildung 137: Maximale Rückstaulängen für die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrten nach Fahrweise

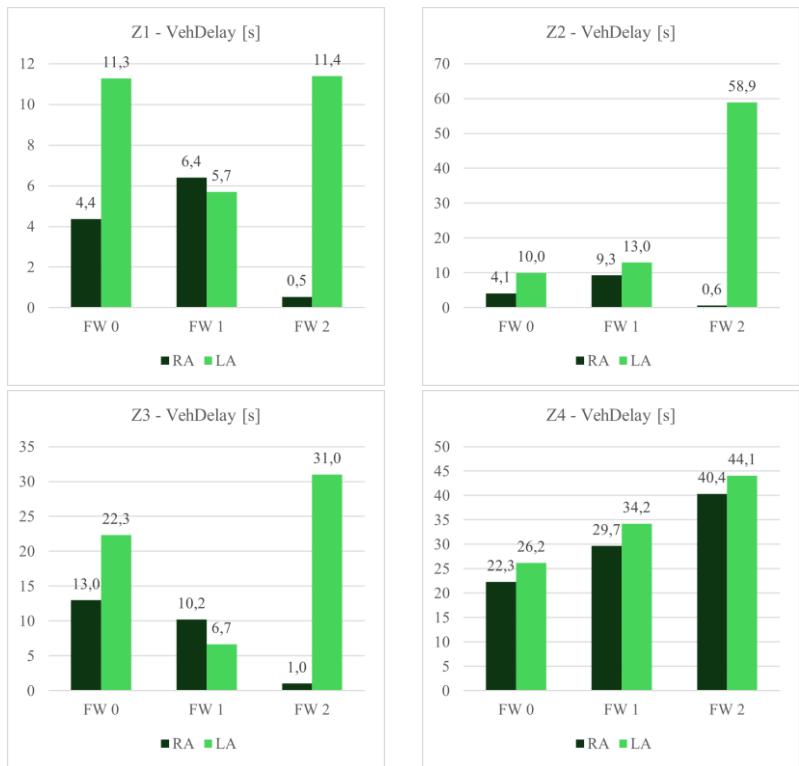


Abbildung 138: Mittelwert der Fahrzeugverlustzeiten für die FFE der jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrten nach Fahrweise

## 8.2 Steigerung der Verkehrsbelastung

Durch Steigerung der Gesamtverkehrsstärke, bei gleichbleibender prozentualer Verteilung der Verkehrsströme, ist zu erwarten, dass sowohl die Werte für ‚StauLngMax‘ als auch für ‚VehDelay‘ steigen. Um dies zu überprüfen, erfolgt eine Steigerung um 5 %, 10 % und 20 %. Eine weitere Steigerung erfolgt nicht, da die Ergebnisse mit zunehmender Extrapolation weiter an Aussagekraft verlieren (vgl. FGsv [2006a]). Ein kompletter Überblick über die Ergebnisse ist in Anhang 6 dargestellt.

Tabelle 66 zeigt die Anzahl der detektierten FFE aus dem Simulationsmodell und der Soll-Werte für die Fahrzeuge aus der Beobachtung. Hierbei wird ersichtlich, dass die Simulations-Werte für die Zufahrten Z1 und Z3 über alle Fahrweisen hinweg und auch bei steigender Verkehrsbelastung dem Soll gleichen. Zugleich ist zu erkennen, dass bei Zufahrt Z2 und Anwendung von Fahrweise 2 gegenüber den anderen Fahrweisen die Soll-Werte nicht erreicht werden und die Anzahl der einfahrenden FFE bei steigender Verkehrsbelastung zurückgeht. Die FFE sind gezwungen, auf den inneren Fahrstreifen einzufahren, da es in der Simulation keine Option wie in der Realität gibt, den als besser erachteten Fahrstreifen zu wählen. Der innere Fahrstreifen ist jedoch bei Fahrweise 2 deutlich stärker belegt, was zu der reduzierten Anzahl an FFE führt. Bei Zufahrt Z4 ist zu beobachten, dass mit steigender Verkehrsbelastung generell nicht mehr alle FFE einfahren können.

Tabelle 66: Detektierte Anzahl an FFE in den Zufahrten bei Steigerung der Verkehrsbelastung (100 Simulationsläufe)

Zu-fahrt	Fahr-weise	Anzahl Fz $q_{ges}=100\%$	Anzahl Fz $q_{ges}=105\%$	Anzahl Fz $q_{ges}=110\%$	Anzahl Fz $q_{ges}=120\%$
Z1	Soll	79	83	86	94
	FW 0	78	83	87	94
	FW1	80	83	87	94
	FW 2	79	82	85	92
Z2	Soll	80	84	88	96
	FW 0	81	84	86	94
	FW1	79	84	88	94
	FW 2	67	66	63	61
Z3	Soll	75	79	82	90
	FW 0	76	79	83	86
	FW1	77	79	83	87
	FW 2	72	77	80	87
Z4	Soll	47	50	52	57
	FW 0	46	46	47	47
	FW1	45	45	45	43
	FW 2	43	43	44	43

Die kontinuierlich und gleichmäßig zunehmenden Staulängen (beispielhaft für Z1 in Abbildung 139 und Abbildung 140 dargestellt) sowie die ebenfalls kontinuierlich und gleichmäßig zunehmenden Fahrzeugverlustzeiten zeigen, dass in den beiden Zufahrten zwar ‚StauLngMax‘ wie erwartet zunimmt, die Kapazität der Zufahrten auch bei Steigerung der Verkehrsbelastung noch nicht erreicht wird, da der Ist-Wert der FFE dem Soll-Wert weiterhin entspricht.

Auffällig ist zudem, dass die Summe der Staulängen bei der Fahrweise 1 für die rechten und linken Fahrstreifen bei beiden Zufahrten größer ist im Vergleich zur Fahrweise 0, bei der Fahrweise 2 ist sie hingegen bei beiden Zufahrten kleiner als bei der Fahrweise 0. Dies ist damit zu erklären, dass in der Beobachtung die Auslastung des linken Fahrstreifens höher ist als bei strikter Einhaltung von Fahrweise 1 und auch die Anzahl der zu beachtenden

Fahrzeuge auf dem äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn bei Fahrweise 1 höher ist als bei Fahrweise 0. Dass Fahrweise 2 hingegen niedrigere Werte aufweist als Fahrweise 0 liegt daran, dass rund 35 % (Z1) bzw. rund 40 % (Z3) der zufahrenden Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen quasi frei ein- und wieder ausfahren können, da in beiden Fällen und bei der gegebenen Verkehrsbelastung lediglich 3 Fz/5 min auf dem äußeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn zu beachten sind (vgl. Abbildung 136) und damit quasi kein Rückstau entsteht.

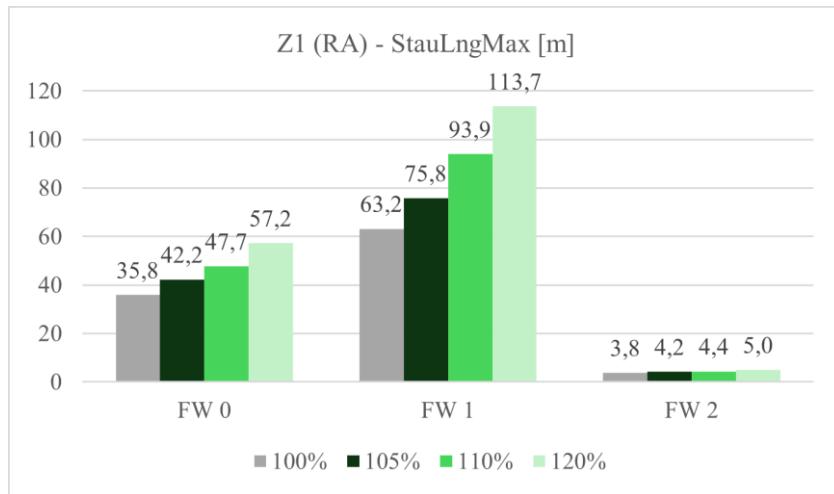


Abbildung 139: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z1 bei steigender Verkehrsbelastung

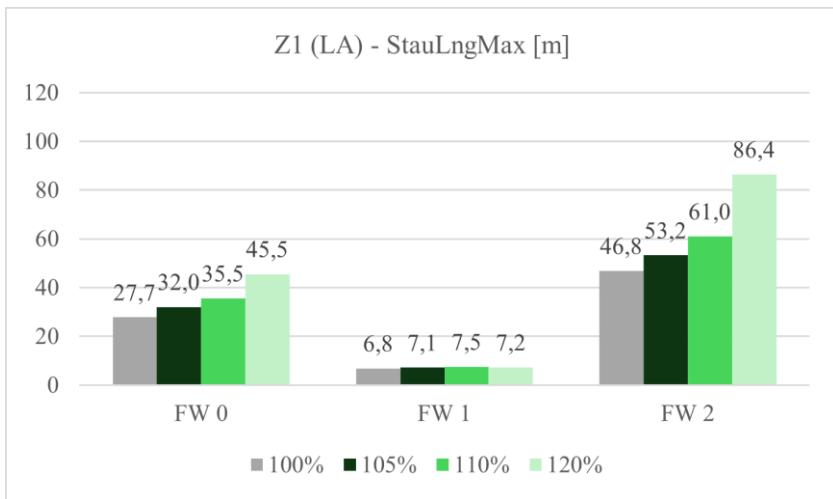


Abbildung 140: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z1 bei steigender Verkehrsbelastung

Wie bereits oben erläutert, erreicht der linke Fahrstreifen der Zufahrt Z2 bei Anwendung von Fahrweise 2 bereits bei der real beobachteten Verkehrsstärke die Kapazitätsgrenze. Wie aus Abbildung 136 ersichtlich wird, weist der Messquerschnitt K2 eine höhere Verkehrsbelastung auf als beispielsweise K1. Zudem bündeln sich nahezu alle Verkehrsströme auf dem inneren Fahrstreifen am Messquerschnitt K2, bei gleichzeitig prozentual stärkster Auslastung des linken Fahrstreifens der Zufahrt Z2. Mit zunehmender Verkehrsbelastung sinkt nicht nur die Anzahl der FFE, die einfahren können, sondern sowohl die ‚StauLngMax‘ als auch ‚VehDelay‘ steigen überproportional stark (vgl. Abbildung 141 und Abbildung 142). Dies bestätigt die Annahme, dass die Kapazität des linken Fahrstreifens der Zufahrt Z2 erreicht ist.

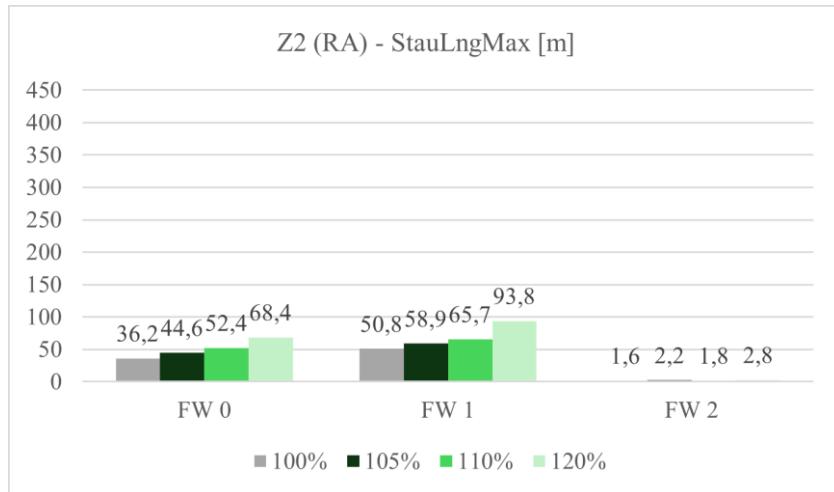


Abbildung 141: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z2 bei steigender Verkehrsbelastung

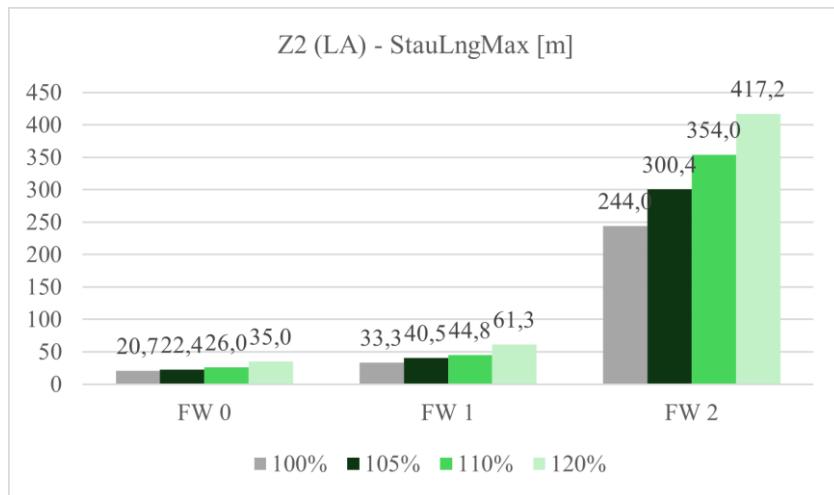


Abbildung 142: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z2 bei steigender Verkehrsbelastung

Bei der einstreifigen Zufahrt Z4 besteht die Tendenz, dass mit zunehmender Verkehrsbelastung nicht mehr alle FFE einfahren können. Dies spiegelt sich auch in den Werten für ‚StauLngMax‘ und ‚VehDelay‘ wider (vgl. Anhang 6). Beide steigen gleichmäßig an, wobei die Fahrweisen 1 und 2 größere Werte als Fahrweise 0 aufweisen (vgl. Abbildung 143). Fahrweise 2 weist dabei die höchsten Werte auf. Dies lässt darauf schließen, dass die Verkehrsteilnehmenden in der Realität den für sie zum Zeitpunkt des Einfahrens günstigeren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn nutzen.

Sowohl die Werte für ‚StauLngMax‘ als auch für ‚VehDelay‘ steigen bei 120 % der Gesamtverkehrsstärke stärker an als bei 105 % und 110 %, was mit Bezug auf die sinkende Anzahl der einfahrenden FFE die Annahme untermauert, dass die Kapazitätsgrenze der Zufahrt erreicht wird.

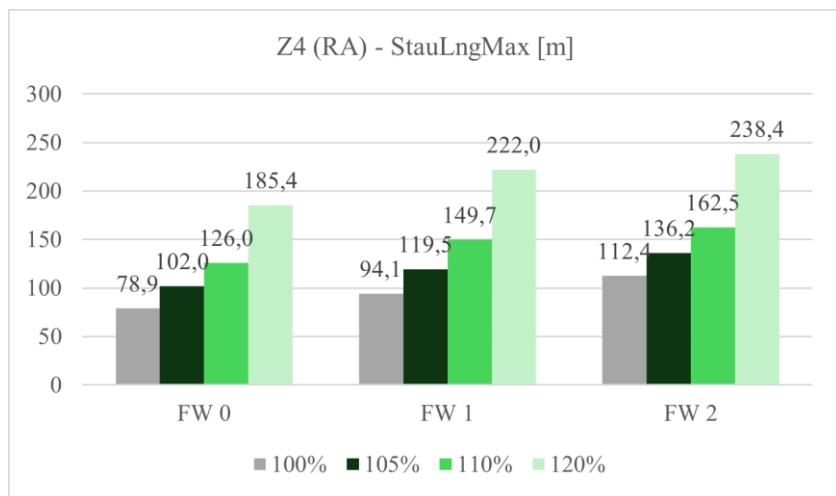


Abbildung 143: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z4 bei steigender Verkehrsbelastung

## 8.3 Systematische Kapazitätsermittlung

Abschließend erfolgt eine systematische Kapazitätsermittlung, wie in den Kapiteln 4.4 und 4.5 bereits für andere Methoden durchgeführt. Als Basis dient die Idee, verschiedene Umlegungen der Gesamtverkehrsstärke auf eine Haupt- und eine Nebenrichtung durchzuführen. Im Ergebnis unterscheiden die sich so berechneten Kapazitäten aus den Kapiteln 4.4 und 4.5 um maximal rund 6,5 %. Da sowohl die Methode nach FGSV [2015a] als auch nach WU & BRILON [2018] eine mehr oder weniger starke Vereinfachung des Verkehrsablaufs darstellen, sollen die Ergebnisse mit dem abschließenden Simulationsexperiment überprüft und eingeordnet werden.

### 8.3.1 Methodik

Die Durchführung der systematischen Kapazitätsermittlung in „PTV Vissim“, mit den im Rahmen der Kalibrierung festgelegten Parametern (vgl. Kapitel 7.4) erfolgt in Anlehnung an die Kapazitätsermittlungen der Kapitel 4.4 und 4.5, indem eine Gesamtverkehrsstärke für den Kreisverkehr festgelegt wird, die dann entsprechend der Vorgaben (vgl. Kapitel 2.3) auf die einzelnen Verkehrsströme und Fahrstreifen umgelegt wird (vgl. Abbildung 15 sowie Abbildung 16). Als Hauptrichtung wird die Achse Z1 / Z3, als Nebenrichtung die Achse Z2 / Z4 definiert. Die Gesamtverkehrsstärke wird sukzessive um 25 Fz/5 min gesteigert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass prinzipiell eine feingliedrigere Untersuchung um die vermutete Kapazität herum notwendig wäre, um genauere Aussagen zur Kapazität treffen zu können. Jedoch zeigen bereits die mit einer Erhöhung der Gesamtverkehrsstärke um jeweils 25 Fz/5 min gewonnenen Ergebnisse häufig nur Abweichungen um ein bis zwei Fahrzeuge je Zufahrt, sodass bereits hier genaue Aussagen zur Höhe der Kapazität nur bedingt möglich sind. Um den Umfang des Simulationsexperiments zu reduzieren, wird ein Startwert für die Gesamtverkehrsstärke von 150 Fz/5 min (entspricht 1.800 Fz/h) festgelegt, da der Bereich unterhalb für Aussagen zur Kapazität irrelevant ist.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der fehlenden Validität des Modells lediglich qualitative Aussagen getroffen werden können (also eine

prozentuale Abweichung der Kapazitäten zwischen den beiden Fahrweisen) und die absoluten Zahlen nicht oder nur bedingt mit denen nach FGSV [2015a] und WU & BRILON [2018] vergleichbar sind.

Um die verschiedenen Methoden zur Kapazitätsermittlung dennoch vergleichbar zu halten, muss das Modell noch einmal angepasst werden. Die in der Realität einstreifige Zufahrt Z4 wird im Modell ebenfalls zweistufig ausgestaltet, um die gewünschte Anzahl an FFE je Fahrstreifen unbeeinflusst vom jeweils anderen Fahrstreifen der Zufahrt einspeisen zu können und somit die entsprechende Verkehrsstärke am nächsten stromabwärts liegenden Messquerschnitt auf der Kreisfahrbahn erreichen zu können.

Bezüglich ihrer Anwendbarkeit und Verwertbarkeit sind für den vorliegenden Kontext verschiedene Optionen zur Definition des Erreichens der Kapazität möglich.

- **Option 1:** Prinzipiell folgt die Definition der Kapazität nach PTV Group [2024] der allgemeinen Definition: *“Die Kapazität ist die größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebener entwurfstechnischer Gestaltung und Verkehrssteuerung, trockener Fahrbahn und Helligkeit in einem Zeitintervall an einem Querschnitt erreichen kann”* [FGSV, 2015b].
- **Option 2a:** Für die Berechnungen in Kapitel 4.4 auf Basis der in FGSV [2015a] dargelegten Formeln wurde als Kriterium zur Erreichung der Kapazität festgelegt, dass diese erreicht ist, wenn ein Fahrstreifen einer Zufahrt den Auslastungsgrad  $x = 1,0$  erreicht hat. Die Ermittlung erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit iterativ mittels eines MS Excel unterstützen Berechnungsverfahrens.
- **Option 2b:** Die Berechnungen in Kapitel 4.5 auf Grundlage der Methodik von WU & BRILON [2018] basieren hingegen auf der Festlegung, dass die Kapazität des Kreisverkehrs dann erreicht ist, wenn an einem der definierten Konfliktpunkte kein stabiler Zustand mehr erreicht wird, die Gesamtverkehrsstärke also nicht mehr erhöht werden kann. Die Ermittlung erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit

ebenfalls iterativ mittels eines MS Excel unterstützen Berechnungsverfahrens.

- **Option 3:** Gemäß dem Konzept des HBS wird die Kapazität an vorfahrtgeregelten Knotenpunkten dann erreicht, wenn die QSV E in einer Zufahrt erreicht wird. Diese wird erreicht, wenn die Wartezeiten einen Wert von 45 s überschreiten. Die Gesamtbewertung des Knotenpunktes entspricht dem schlechtesten QSV der Zufahrten. [FGSV, 2015b]

Bezüglich ihrer Anwendbarkeit und Verwertbarkeit im vorliegenden Kontext sind die verschiedenen Optionen wie folgt einzuordnen.

#### **Option 1:** Ermittlung des Maximums der Gesamtverkehrsstärke

Wie oben beschrieben ist sukzessive die Anzahl der eingespeisten Fahrzeuge (Soll-Wert) zu erhöhen. Dem gegenüber steht der in der Knotenauswertung ermittelte Ist-Wert, welcher den in der Simulation gemessenen Mittelwert der Gesamtzahl an Fahrzeugen, die den Knotenpunkt im Intervall passieren können, darstellt. Während bei niedrigeren Gesamtverkehrsbelastungen beide Werte im Rahmen der zufallsbedingten Abweichung übereinstimmen, nähert sich der Ist-Wert ab einer bestimmten Größe dem Maximum der möglichen Gesamtverkehrsstärke an (vgl. Abbildung 144).

Durch alleinige Betrachtung des erreichbaren Maximums an FFE fehlen Aussagen zur Verkehrsqualität (Rückstaulängen und Verlustzeiten). In den Simulationsergebnissen zur Steigerung der Verkehrsbelastung (Kapitel 8.2) ist zudem zu beobachten, dass die Gesamtverkehrsstärke in der Regel noch gesteigert werden kann, obwohl die Zufahrten in der Nebenrichtung bereits sehr lange Fahrzeugverlustzeiten und Rückstaulängen aufweisen. Das heißt, einzelne Zufahrten wären je nach Definition bereits überlastet. Somit weicht die Ermittlung des Maximums der Gesamtverkehrsstärke von den Definitionen der beiden anderen Berechnungsmethoden (Kapitel 4.4 und 4.5) ab und liefert Ergebnisse, die nicht vergleichbar sind.

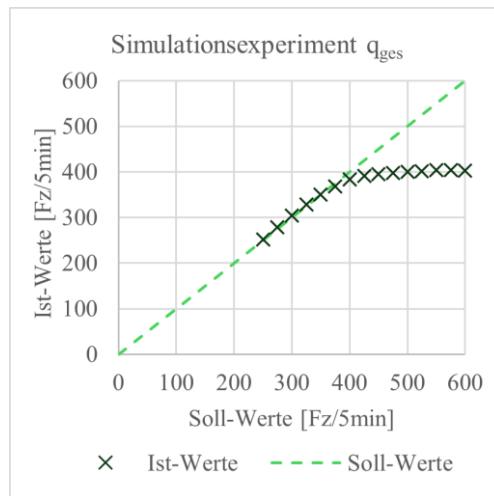


Abbildung 144: Schematische Darstellung der Entwicklung der Gesamtverkehrsstärke

**Option 2a und 2b:** Steigerung der Gesamtverkehrsstärke, bis sich die Verkehrsstärke auf mindestens einem Fahrstreifen nicht mehr weiter steigern lässt.

Die Option entspricht prinzipiell den Vorgaben aus Kapitel 4.4 sowie 4.5. Im Rahmen des Simulationsexperiments wird die Kapazität als erreicht definiert, wenn die Verkehrsstärke auf mindestens einem Fahrstreifen der Zufahrten oder der Kreisfahrbahn nicht mehr gesteigert werden kann. In Abbildung 145 ist dies grafisch dargestellt, zur Verdeutlichung ist der dort rot eingehaumte Bereich (Werte für die rechten Fahrstreifen der Zufahrten Z1 und Z3) in Abbildung 146 detailliert dargestellt.

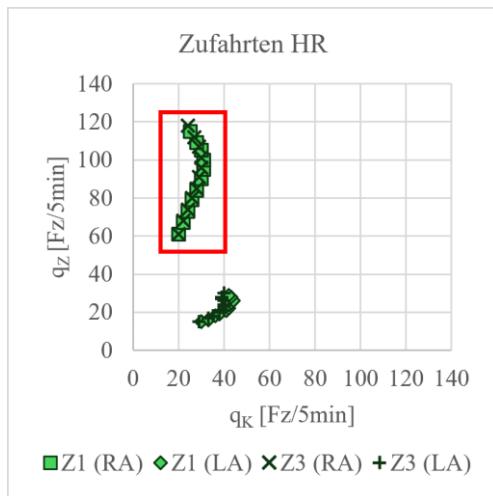


Abbildung 145: Darstellung der ermittelten Wertepaare für die Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn sowie der Zufahrten der Hauptrichtung

Abbildung 146 zeigt den Punkt, an dem keine weitere Steigerung der Verkehrsstärke mehr möglich ist (roter Pfeil). Hier wird in der Hauptrichtung das Maximum von  $q_K$  erreicht. Mit zunehmender Erhöhung der Gesamtverkehrsstärke ist zwar noch eine Erhöhung von  $q_Z$  möglich, welche jedoch gleichzeitig mit einem Rückgang von  $q_K$  verbunden ist und damit mit einer zunehmenden Umverteilung der Vorgabe (z. B. HR/NR = 60/40) zugunsten der Hauptrichtung (die Tendenz geht in diesem Fall zu HR/NR = 70/30).

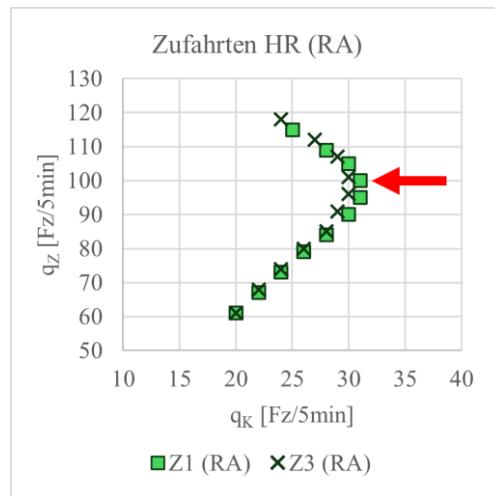


Abbildung 146: Darstellung der ermittelten Wertepaare für die Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn sowie der Zufahrten der Hauptrichtung (Detail)

Die oben dargelegten Beobachtungen treten analog auf der Nebenrichtung auf (vgl. Abbildung 147 und Abbildung 148). Hier ist zu erkennen, dass  $q_Z$  das Maximum erreicht und eine weitere Steigerung der Gesamtverkehrsstärke zwar eine Steigerung von  $q_K$  ermöglicht, dies aber gleichzeitig einen Rückgang von  $q_Z$  nach sich zieht. Dabei entspricht die Steigerung von  $q_K$  der steigenden Zahl an FFE aus den Zufahrten der Hauptrichtung und der oben erläuterten Umverteilung der Vorgaben.

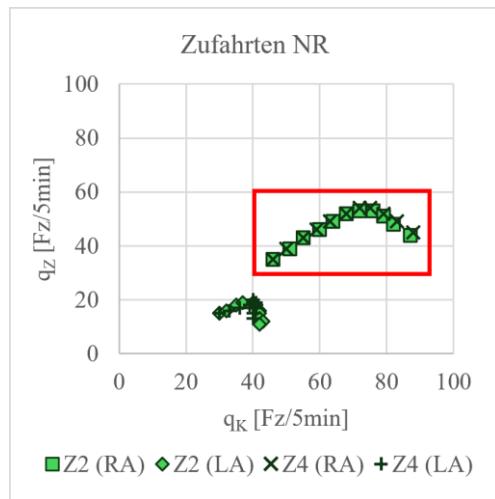


Abbildung 147: Darstellung der ermittelten Wertepaare für die Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn sowie der Zufahrten der Nebenrichtung

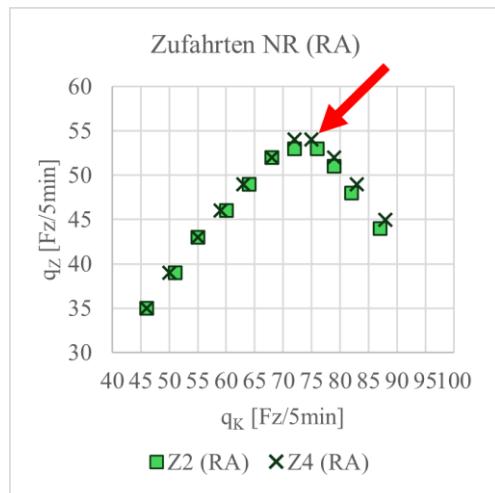


Abbildung 148: Darstellung der ermittelten Wertepaare für die Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn sowie der Zufahrten der Nebenrichtung (Detail)

**Option 3:** Steigerung der Gesamtverkehrsstärke, bis die FFE mindestens eines Fahrstreifens ,*VehDelay*‘ von > 45 s aufweisen

Die Vorgaben für Option 3 entsprechen den Festlegungen des HBS und auch dem ausgegebenen Maß für die Verkehrsqualität (Level-of-Service) in ‚PTV Vissim‘. Die in ‚PTV Vissim‘ ausgegebene ,*VehDelay*‘ basiert dabei auf den Werten des HCM und ist somit nicht mit der Wartezeit nach dem HBS gleichzusetzen. Die ,*VehDelay*‘ beschreibt nach PTV Group [2024] die Differenz zwischen tatsächlicher Reisezeit und theoretischer Reisezeit bei freier Fahrt, gemittelt über alle Fahrzeuge eines Verkehrsstroms. Die mittlere Wartezeit nach HBS hingegen wird rein analytisch bestimmt, weshalb eine systematische Abweichung zu erwarten ist. [PTV Group, 2024] Somit kann auf dieser Basis zwar ein Vergleich zwischen den Fahrweisen stattfinden, jedoch keine Ermittlung der Kapazität erfolgen.

Im Ergebnis verbleibt lediglich **Option 2**, um das Erreichen der Kapazität zu identifizieren.

### 8.3.2 Ergebnisse

Bei der Auswertung der Ergebnisse sind zwei Beobachtungen besonders hervorzuheben. Zum einen ergeben sich für Fahrweise 1 vergleichsweise hohe Kapazitäten von bis zu 410 Fz/5 min, was rund 4920 Fz/h entspricht. Zwar wurden in der Beobachtung Werte bis zu 3360 Fz/h ermittelt, ohne die Kapazität zu erreichen, jedoch erscheinen die Werte im Vergleich mit der Realität und den Erkenntnissen aus den Kapiteln 4.4 und 4.5 zu hoch (vgl. Abbildung 149). Wie zu Beginn des Kapitels 8 erläutert, folgt dies aus der eingeschränkten Kalibrierbarkeit und Validierbarkeit des Simulationsmodells. Die Abnahme der Kapazität mit zunehmender Ungleichverteilung der Verkehrsbelastung auf HR/NR beträgt bei Fahrweise 1 rund 90 Fz und somit rund 22 %. Die Abnahme bei den in Kapitel 4.4 und 4.5 durchgeführten Berechnungen beträgt hingegen lediglich rund 14 %.

Zum anderen ist auffällig, dass die Kapazitäten bei Fahrweise 2 rund 25 % bis 32 % unter denen der Fahrweise 1 liegen, während diese im Rahmen der in

Kapitel 4.5 durchgeföhrten Berechnungen lediglich maximal 6,5 % Abweichung aufweisen (vgl. Abbildung 149). Dies muss kritisch hinterfragt werden. Eine mögliche Erklärung besteht darin, dass die für die Konfliktflächen der linken Fahrstreifen der Zufahrten angepassten Attribute ein zögerlicheres Ein-fahrerverhalten bedingen als die Attribute der Konfliktflächen der rechten Fahrstreifen der Zufahrten. Dass dies durchaus als realistisch erachtet werden kann, zeigen die Ansätze von WU & BRILON [2018], die bei zweistreifigen Zufahrten eine um rund 10 % höhere Grundkapazität des rechten Fahrstreifens gegenüber dem linken Fahrstreifen vorgeben. Um auszuschließen, dass dies der entscheidende Faktor für die große Abweichung ist, werden die Konfliktflächen der rechten Fahrstreifen mit den Attributen der Konfliktflächen der linken Fahrstreifen belegt. Die Auswirkungen auf die Kapazität zeigt Abbildung 150. Wie dort ersichtlich wird, weicht die Kapazität für das modifizierte Modell (FW1mod) lediglich um maximal 8 % von den ermittelten Kapazitäten des ursprünglichen Modells bei Fahrweise 1 ab und liegt damit immer noch bis zu rund 28 % über den ermittelten Kapazitäten nach Fahrweise 2.

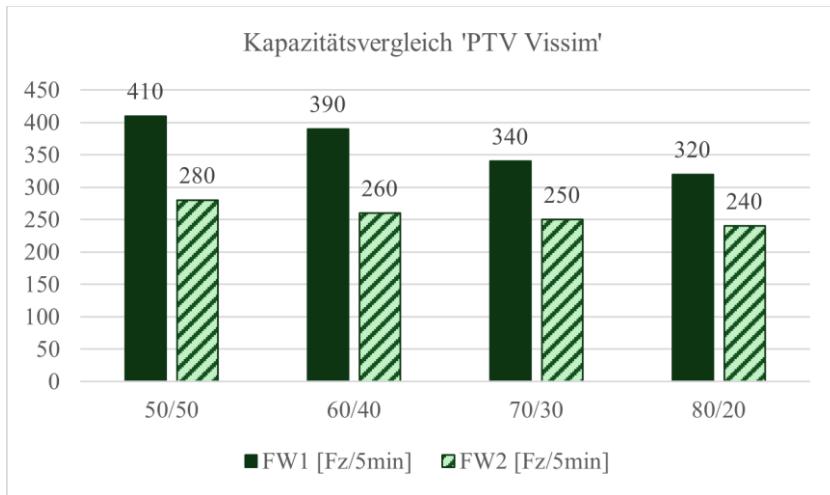


Abbildung 149: Kapazitätsvergleich von Fahrweise 1 mit Fahrweise 2 im Rahmen des Simulationsexperiments mit „PTV Vissim“

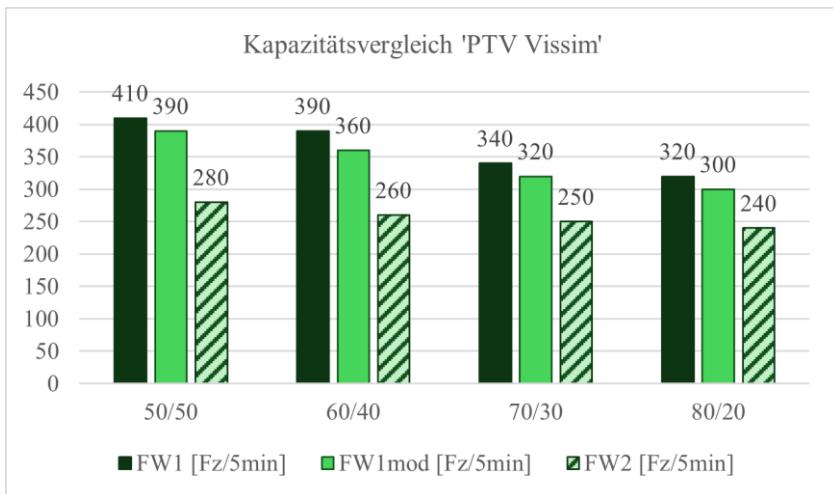


Abbildung 150: Kapazitätsvergleich von Fahrweise 1 mit dem modifizierten Modell für Fahrweise 1 (FW1mod) und Fahrweise 2 im Rahmen des Simulationsexperiments mit „PTV Vissim“

Es zeigt sich in den Auswertungen, dass auf dem linken Fahrstreifen im Vergleich zu Fahrweise 1 bereits bei niedrigen Verkehrsstärken keine Steigerung der Verkehrsbelastung auf diesen Fahrstreifen mehr möglich ist. Zwar ist die Verkehrsbelastung auf dem jeweils rechten Fahrstreifen weiter steigerbar, diese steigt aber verhältnismäßig langsam um ein bis zwei Fahrzeuge je Erhöhungsschritt an, während die Rückstaulängen auf den linken Streifen stark steigen. Dies veranschaulicht auch Abbildung 151. Die beiden roten Pfeile zeigen die Wertepaare bei Erreichen der Kapazität. Die Verteilung der einfahrenden FFE nähert sich zunehmend der Verteilung HR/NR = 50/50 an.

Letztendlich ähnelt der Verkehrsablauf damit bei genauerer Betrachtung mehr dem an einem einstreifigen Kreisverkehr mit vier Bypässen als dem an einem zweistreifigen Kreisverkehr, was die große Abweichung von rund 30 % zur Fahrweise 1 begründen kann (vgl. Kapitel 2.2.2 sowie [FGSV, 2006b] und [FGSV, 2015b]). Dem entgegen sprechen die Ergebnisse aus Kapitel 4.5.

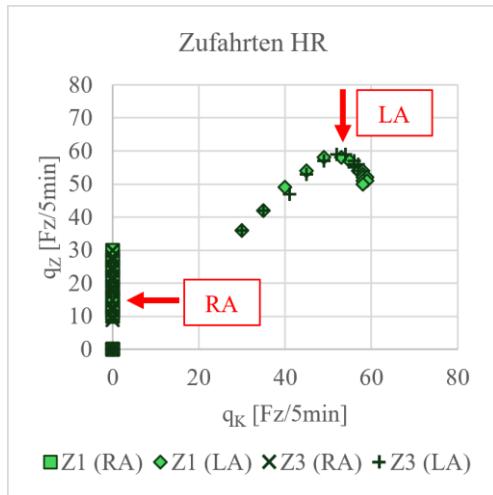


Abbildung 151: Entwicklung der möglichen Verkehrsbelastungen der Zufahrten der Haupttrichtung bei Anwendung von Fahrweise 2

## 8.4 Zusammenfassung und Interpretation des Simulationsexperiments

Abbildung 152 zeigt die in Kapitel 8.3 ermittelten Kapazitäten im Vergleich zu den ermittelten Kapazitäten der Kapitel 4.4 und 4.5. Ergänzend hierzu sind die prozentualen Abweichungen zwischen den Ergebnissen aus Kapitel 4.4 und den Ergebnissen der Simulation in Tabelle 67 sowie analog dazu die Abweichungen der Ergebnisse aus Kapitel 4.5 zu den Ergebnissen der Simulation in Tabelle 68 aufgelistet. Dabei ist zum einen eine gute Übereinstimmung zwischen der Simulation und FGSV [2015a] zu erkennen, zum anderen eine große Abweichung zwischen der Simulation und WU & BRILON [2018].

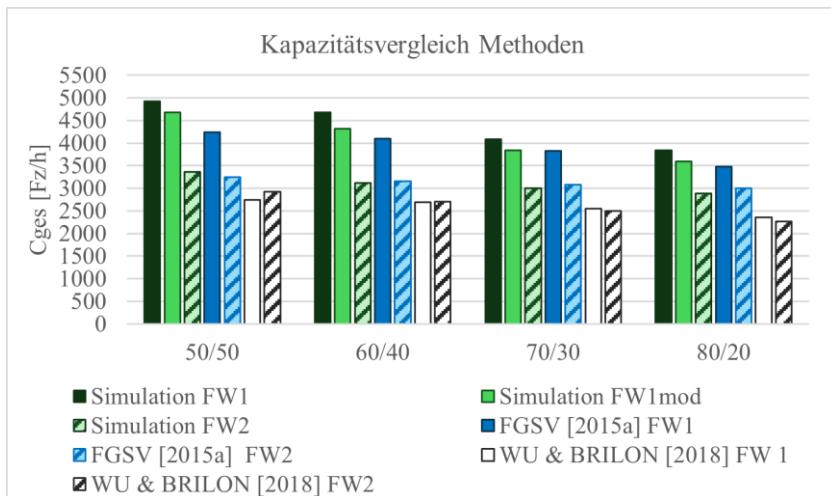


Abbildung 152: Kapazitätsvergleich der Berechnungsergebnisse aus ‚PTV Vissim‘ sowie den Berechnungen nach FGSV [2015a] und WU & BRILON [2018]

Tabelle 67: Abweichung der Ergebnisse der Berechnungen nach FGSV [2015a] zu den Ergebnissen des Simulationsexperiments (100 Simulationsläufe)

Verteilung HR/NR	Fahrweise 1	Fahrweise 1 modifiziert	Fahrweise 2
50/50	-14 %	-10 %	-4 %
60/40	-12 %	-5 %	+1 %
70/30	-6 %	0 %	+3 %
80/20	-9 %	-3 %	+4 %

Tabelle 68: Abweichung der Ergebnisse der Berechnungen nach WU & BRILON [2018] zu den Ergebnissen des Simulationsexperiments (100 Simulationsläufe)

Verteilung HR/NR	Fahrweise 1	Fahrweise 1 modifiziert	Fahrweise 2
50/50	-44 %	-41 %	-13 %
60/40	-43 %	-38 %	-13 %
70/30	-38 %	-34 %	-17 %
80/20	-39 %	-34 %	-21 %

Die Ergebnisse des Simulationsexperiments sowie die der Berechnungen nach Kapitel 4.4 erscheinen insofern plausibel, als dass bei Fahrweise 1 der innere Fahrstreifen die Kapazität tatsächlich erweitert, während Fahrweise 2 eher einem einstreifigen Kreisverkehr mit Bypässen entspricht und demnach ein deutlicher Unterschied zwischen den Fahrweisen besteht.

Die Plausibilität der Berechnungen nach Kapitel 4.5 soll an dieser Stelle nicht infrage gestellt werden, sie kann aber auch nicht bewiesen werden. Bei den Berechnungen nach WU & BRILON [2018] wird die Kapazität erreicht, da der maximal mögliche Auslastungsgrad auf der Kreisfahrbahn erreicht ist. Entsprechende Verkehrszustände wurden in den vorhandenen Videoaufnahmen nicht beobachtet und demnach gab es diesbezüglich keine Rückschlüsse zur ‚Richtigkeit‘ des Simulationsmodells in diesen Bereichen.

Als Ergebnis der systematischen Kapazitätsanalyse lässt sich festhalten, dass eine strikte Anwendung der Fahrweise 2 keine positiven Auswirkungen auf die Kapazität eines zweistreifig befahrbaren Kreisverkehrs hat. Jedoch ist auch festzuhalten, dass Fahrweise 1 ebenfalls kein Optimum darstellt. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die linken Fahrstreifen (für die betrachteten Intervalle) der Zufahrten Z1 und Z3 in der Beobachtung deutlich häufiger genutzt werden als nach Fahrweise 1. Die simulierten Rückstaulängen auf den jeweils beiden Fahrstreifen nähern sich dabei für Fahrweise 0 einander an, während sich bei den Fahrweisen 1 und 2 die Rückstaulängen auf je einem Fahrstreifen konzentrieren. Es liegen hierzu zwar keine validen Daten vor, jedoch scheint dies der oft zitierten Verkehrsabhängigkeit der Wahl des Fahrstreifens in der

Zufahrt (z. B. [BRILON & GEPPERT, 2015c]) geschuldet zu sein und zeigt in der Simulation positive Auswirkungen.

# 9 Fazit und Ausblick

## 9.1 Methodik

Mit den klassischen Methoden zur Knotenpunktzählung, wie beispielsweise einer händischen Zählung oder der videobasierten Zählung mittels seitlich aufgestellter Kamera(s) war es bislang zwar möglich, einzelne Querschnitte zu zählen, jedoch war es bereits bei einstreifigen Kreisverkehren nicht oder nur bedingt möglich, Fahrzeuge einzelnen Verkehrsströmen zuzuordnen. Um dies zu ermöglichen, wurde in der vorliegenden Arbeit eine Methodik entwickelt, bei der Drohnenaufnahmen die Grundlage bilden. Damit ist es nun sogar für zweistufige Kreisverkehre möglich, die Daten zu ermitteln. Diese bilden dann die Grundlage, um die einzelnen Verkehrsströme im Rahmen einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation auf die Fahrstreifen der Zufahrten und der Kreisfahrbahn umzuverteilen und damit auch unterschiedliche Fahrweisen abzubilden. Zwar gibt es ähnliche, automatisierte Ansätze, die insbesondere im Rahmen der Forschung zum automatisierten Fahren Anwendung finden. Der Fokus liegt dabei auf der Evaluierung des menschlichen Verhaltens und nicht auf der Ermittlung verkehrstechnisch relevanter Kennwerte. Bislang wurden diese bestehenden Ansätze zum einen nicht oder nur bedingt auf Fragestellungen im Verkehrswesen übertragen und zum anderen handelt es sich häufig um firmeneigene Software oder programmiertechnisch komplexe Anwendungen. Die vorgestellte Methodik bietet hingegen einen niederschwülligen Ansatz, der auch ohne spezialisiertes Fachwissen und mit frei verfügbarer Software die gewünschten Erkenntnisse liefern kann.

Durch die so ermittelten Erkenntnisse über die einzelnen Verkehrsströme und deren Trajektorien wird zudem ein direkter Abgleich der Fahrverhalten von Realität und ‚PTV Vissim‘ ermöglicht. Dadurch kann das Simulationsmodell besser an die Realität angeglichen werden. Zudem kann dadurch besser nachvollzogen und beschrieben werden, in welchen Punkten ein Modell von der Realität abweicht.

## 9.2 „PTV Vissim“

Auf Grundlage der Verkehrserhebung des ‚Pullacher Kreisels‘ wurde ein Modell mit ‚PTV Vissim‘ erstellt. Die Modellierung stößt dabei in einigen Bereichen an ihre Grenzen. So sind beispielsweise zur korrekten Abbildung der Routenwahl und des Fahrverhaltens auf der Kreisfahrbahn einstreifige Zwischenquerschnitte notwendig. Diese wiederum bedingen bei korrekter Abbildung der Ausfahrvorgänge eine signifikante Erhöhung der Konfliktflächen im Bereich der Zufahrten. Dies führt wiederum zu einer steigenden Anzahl an Störstellen im Netz, welche durch die FFE zu berücksichtigen sind. Hierdurch wird nicht nur die Initialisierung des Modells, sondern auch dessen Kalibrierung und Validierung erheblich erschwert. Des Weiteren sind die Ausfahrvorgänge derzeit nicht über Konfliktflächen abbildbar, sondern es muss auf Querverkehrsstörungen zurückgegriffen werden, um den Verkehrsfluss aufrecht zu erhalten und abzubilden. Beides führt zu Einschränkungen bzw. Kompromissen, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Andere Einschränkungen des Modells, wie beispielsweise, dass das Fahren der ‚Ideallinie‘ einzelner Fahrzeuge nicht abgebildet werden kann, haben hingegen keine Auswirkungen auf das Ergebnis und können vernachlässigt werden.

Im Rahmen der Arbeit wurde zudem eine Methodik zur Validierung des Fahrverhaltens in ‚PTV Vissim‘ anhand der Daten der Verkehrsuntersuchung entwickelt. Hierbei stellt das von ‚PTV Vissim‘ ausgegebene Fahrzeugprotokoll eine zentrale Rolle dar. Zum einen kann anhand dessen das Fahrverhalten der FFE mit dem Fahrverhalten der Realität verglichen werden, zum anderen können die darin dokumentierten Geschwindigkeiten Hinweise liefern, an welchen Stellen des Netzes Bereiche mit ungewollt verringerten Geschwindigkeiten auftreten, sodass auch diese mit der Realität abgeglichen werden können.

Die Validität des Modells ist dennoch in Teilen eingeschränkt. Zum Großteil ist dies dem beschränkten Bildausschnitt aus der Verkehrsuntersuchung geschuldet. Dieser bedingt, dass lediglich Aussagen zu den Reisezeiten auf der Kreisfahrbahn sowie zwei der vier Zufahrten getroffen werden können, teilweise sogar begrenzt auf die linken Fahrstreifen. Die im Rahmen der Kalibrierung und Validierung ermittelten Werte für die Attribute entsprechen keinem

allgemeingültigen Parametersatz (Attribute der Konfliktflächen, Langsamfahrbereiche), können aber als Anhaltspunkte für die Kalibrierung anderweitiger Modelle zweistreifiger Kreisverkehre herangezogen werden. Gleches gilt für die aufgezeigten Lösungsansätze hinsichtlich der Ausfahrbereiche, Zufahrten und Kreisfahrbahn.

### 9.3 Kapazität

Zur Überprüfung des Einflusses unterschiedlicher Fahrweisen auf die Kapazität wurden Berechnungen anhand des ‚Arbeitspapiers Turbokreisverkehre‘ [FGSV, 2015a], der Konflikttechnik nach WU & BRILON [2018] sowie einem Simulationsexperiment in ‚PTV Vissim‘ durchgeführt.

Die Ergebnisse des Simulationsexperiments und deren Einordnung hinsichtlich der Plausibilität im Vergleich mit den anderen diskutierten Berechnungsverfahren wurden in Kapitel 8.4 dargelegt und interpretiert. Die verschiedenen Berechnungsverfahren führen demnach zu unterschiedlich hohen Kapazitäten, zu unterschiedlich stark ausgeprägten Kapazitätsrückgängen bei zunehmender Ungleichverteilung der Verkehrsbelastung sowie zu unterschiedlich stark ausgeprägten Kapazitätsunterschieden zwischen den Fahrweisen 1 und 2.

Als Ergebnis aller Berechnungen ist festzuhalten, dass keine Empfehlung für eine einheitliche, gesetzlich geregelte Fahrweise ausgesprochen werden kann, da keine Fahrweise eine eindeutig positive Beeinflussung der Kapazität mit sich bringt. Vielmehr bestätigen die Ergebnisse die in weiten Teilen der Welt vorhandene Freiheit bei der Fahrstreifenwahl. Ob dabei die Empfehlungen der Automobilclubs zur Befolgung von Fahrweise 1 (beispielsweise in Deutschland oder Frankreich) einen Beitrag dazu leisten, dass der linke Fahrstreifen im untersuchten Fall auffällig häufig genutzt wird oder ob eher Ortskenntnis und Gewohnheit dies begünstigen, lässt sich aufgrund der vorliegenden Untersuchungen nicht beurteilen.

## 9.4 Ausblick

Die aufgezeigte Methodik zur Ermittlung der Trajektorien auf Grundlage von Drohnenaufnahmen kann künftig auch für anderweitige Fragestellungen im Bereich der Straßenverkehrstechnik angewendet werden und ist dazu ggf. zu modifizieren und/oder zu automatisieren. Dabei besteht prinzipiell die Möglichkeit, auch größere Bereiche durch den Einsatz mehrerer, synchronisierter Drohnen zu analysieren, um daraus weitere Parameter wie beispielsweise die Rückstaulängen zu bestimmen. Zudem könnte in diesem Zusammenhang überprüft werden, ob Attribute der Simulation auf diesem Weg in der Realität gemessen und direkt in „PTV Vissim“ übernommen werden können. Beispielhaft sind hier die Werte der Attribute der Querverkehrsstörungen oder eine direkte Beurteilung der Fahrzeugverlustzeiten (*VehDelay*) zu nennen. Auch die Ergänzung durch Messfahrten können in diesem Zuge zur Beurteilung des Einflussbereichs des Knotenpunkts auf den Verkehrsfluss in Erwägung gezogen werden. Hierzu sollten die Messfahrzeuge mit einer markanten, aus der Vogelperspektive erkennbaren Markierung versehen werden, um die zeitliche Zuordnung der Messfahrzeugdaten zu den Drohnenaufnahmen zu ermöglichen.

Um die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit weiter zu verifizieren, ist es zudem notwendig, die Anzahl der untersuchten Kreisverkehre zu erhöhen sowie das tatsächliche Fahrverhalten beispielsweise in Portugal (Fahrweise 2) ebenfalls anhand von Verkehrsuntersuchungen zu plausibilisieren. Dies ist insbesondere auch im Hinblick auf die dortige Befolgung der gesetzlichen Vorgaben an zweistreifigen Kreisverkehren notwendig. Zudem wäre in diesem Zusammenhang zu hinterfragen, inwiefern die Regelungen erst bei Kreisverkehren mit mehr als zwei Fahrstreifen Vorteile bringen.

Von weiterem Interesse ist der Versuch, die Ergebnisse von WU & BRILON [2018] in der Simulation abzubilden. Hierzu müssten insbesondere Bereiche/Konfliktpunkte, an denen das Berechnungsmodell von WU & BRILON [2018] die maximale Auslastung erreicht, isoliert betrachtet und in der Simulation nachgebildet werden. Die Simulation könnte hierbei Rückschlüsse auf weitere zu implementierende „Störfaktoren“ liefern.

# **Genutzte Hilfsmittel**

MS Word

MS Excel

PTV Vissim 2024, Service Pack 09

Kinovea (<https://www.kinovea.org/>)

draw.io

QGIS 3.14

Citavi 6.14

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Qualitativer Überblick über die Verbreitung von Kreisverkehren in Europa, Kartengrundlage: [EUROSTAT, 2018] Datengrundlage: [OpenStreetMap Foundation, 2020]	6
Abbildung 2:	Orientierungswerte für die Kapazität von Kreisverkehren außerhalb bebauter Gebiete [FGSV, 2015a]	8
Abbildung 3:	Orientierungswerte für die Kapazität von Kreisverkehren innerhalb bebauter Gebiete [FGSV, 2006b]	9
Abbildung 4:	Empfehlungen des ADAC bzw. der Association Prévention Routière, nach [ADAC, 2005; APR, 2017]	13
Abbildung 5:	Darstellung der Regelungen an mehrstreifigen Kreisverkehren in Großbritannien, nach [Vereinigtes Königreich Großbritannien und Nordirland, 2019]	15
Abbildung 6:	Schematische Darstellung der Fahrweise 2	16
Abbildung 7:	Überblick über die Anwendung der Fahrweisen in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union sowie der Schweiz und Großbritannien, Kartengrundlage: [EUROSTAT, 2018]	17
Abbildung 8:	Gegenüberstellung Flächenbedarf und versiegelte Fläche von zweistreifigem Kreisverkehr (rote Linie) und einstreifigem Kreisverkehr mit vier Bypässen (blaue Linie, dunkel Cyan hinterlegt)	19
Abbildung 9:	Bypass an einem einstreifigen Kreisverkehr mit Führung des Fuß- und Radverkehrs in Karlsruhe [WOLLF, 2021]	20
Abbildung 10:	Bypass an einem einstreifigen Kreisverkehr mit Führung des Fuß- und Radverkehrs [FGSV, 2006b]	21
Abbildung 11:	Konfliktpunkte an einem zweistreifigen Kreisverkehr bei Anwendung der Fahrweise 1 (links) bzw. der Fahrweise 2	

(rechts), Darstellung in Anlehnung an [SCHNABEL et al., 2011] .....	25
Abbildung 12: Konfliktpunkte beim Turbokreisverkehr, Darstellung in Anlehnung an [SCHNABEL et al., 2011].....	26
Abbildung 13: Strombezeichnungen gemäß HBS [FGSV, 2015b].....	27
Abbildung 14: Abwicklung eines Abschnitts der Kreisfahrbahn zwischen zwei Zufahrten [WACHSMANN, 2016] .....	28
Abbildung 15: Verteilung der Verkehrsströme auf Haupt- und Nebenrichtung im Verhältnis 60/40 .....	29
Abbildung 16: Verteilung des Zuflusses aus Z1 auf die Ausfahrten A2, A3 und A4.....	30
Abbildung 17: Prozentuale Zu- bzw. Abnahme der Verkehrsstärken an verschiedenen Querschnitten, Abschnitt zwischen Z1 nach Z2 (Hauptrichtung nach Nebenrichtung) .....	32
Abbildung 18: Prozentuale Zu- bzw. Abnahme der Verkehrsstärken an verschiedenen Querschnitten, Abschnitt zwischen Z2 nach Z3 (Nebenrichtung nach Hauptrichtung) .....	32
Abbildung 19: Abflussgesetz der wartepliktigen Fahrzeuge [SCHNABEL et al., 2011] .....	41
Abbildung 20: Zustände im Hauptstrom und deren Wahrscheinlichkeiten [WU, 1997a].....	44
Abbildung 21: Vergleich der Ansätze Zeitlückenverfahren SIEGLOCH, WU und BRILON [LINDENMANN et al., 2009] .....	49
Abbildung 22: Grundkapazität GPE zweistufiger Kreisverkehre [FGSV, 2015b] .....	50
Abbildung 23: Kapazität von Kreisverkehren nach HCM [National Research Council, 2016] .....	52
Abbildung 24: Kapazität C und Auslastungsgrad x des rechten Fahrstreifens der Zufahrt Z1 bei entsprechender Verteilung der Gesamtverkehrsstärke $q_{\text{ges}}$ von HR/NR = 50/50 und daraus ermittelten Kapazitäten $C_Z$ und $C_{\text{ges}}$ (roter Pfeil) ...	55

---

Abbildung 25:	Kapazität C und Auslastungsgrad x des linken Fahrstreifens der Zufahrt Z1 bei entsprechender Verteilung der Gesamtverkehrsstärke $q_{ges}$ von HR/NR = 50/50 und daraus ermittelte Kapazitäten $C_z$ und $C_{ges}$ (roter Pfeil) .....	56
Abbildung 26:	Vergleich der ermittelten Kapazitäten nach [FGSV, 2015a] .....	57
Abbildung 27:	Berechnungsrichtung gegen den Strom [BRILON & WU, 2017] .....	59
Abbildung 28:	Ergebnisse der Berechnung nach [WU & BRILON, 2018] .....	63
Abbildung 29:	Vergleich der Ergebnisse von Simulationsergebnissen mit der empirisch ermittelten Kapazität [BRILON & GEPPERT, 2015c] .....	69
Abbildung 30:	Potenzielle Lastfälle für das Simulationsexperiment .....	71
Abbildung 31:	Darstellung der Lastfälle und Obergrenzen für verschiedene QSV für einen 2/2-KV (Darstellung in Anlehnung an [VORTISCH et al., 2020]) .....	73
Abbildung 32:	Ermittlung der Kapazität an einer einstreifigen Ausfahrt an einer zweistreifigen Hauptfahrbahn einer Autobahn anhand verschiedener Belastungsverhältnisse [GEISTEFELDT et al., 2017] .....	75
Abbildung 33:	Schematische Darstellung der Untersuchungsschritte bei der Kapazitätsanalyse mittels ‚PTV Vissim‘ und ‚MS Excel‘ .....	76
Abbildung 34:	Kreisverkehr in Alsdorf-Neuweiler bei Aachen [KRAJEWSKI, MOERS & BOCK, 2020] .....	79
Abbildung 35:	Aus den OpenSource-Daten [KRAJEWSKI, MOERS & BOCK, 2020] erzeugte Trajektorien eines erhobenen Intervalls.....	80
Abbildung 36:	Ausschnitt der Filmaufnahmen in Weinstadt-Endersbach [WACHSMANN, 2016].....	81

Abbildung 37:	Ausschnitt der Filmaufnahmen in Königsbrunn, Kamera 2 [NOACK, 2019].....	82
Abbildung 38:	Lage des ‚Pullacher Kreisel‘ im Straßennetz [Bayerische Straßenbauverwaltung, 2023].....	83
Abbildung 39:	Luftaufnahme des ‚Pullacher Kreisels‘ aus Richtung Westen [XMS eXpert Media Solutions, 2023] .....	84
Abbildung 40:	Ergebnisse der Straßenverkehrszählung 2021, mit Bezug zum ‚Pullacher Kreisel‘ [Bayerische Straßenbauverwaltung, 2023] .....	84
Abbildung 41:	Ausrichtung der Drohne mittig über der Kreisinsel [XMS eXpert Media Solutions, 2023] .....	85
Abbildung 42:	Übersicht über die Gesamtverkehrsstärke je erfasstem Intervall, umgerechnet in Fz/h .....	89
Abbildung 43:	Übersicht über die Anzahl der Fahrzeuge in den Zufahrten und deren Aufteilung auf die einzelnen Fahrstreifen .....	89
Abbildung 44:	Ergebnisse der Verkehrszählung des Intervalls 06 von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr .....	91
Abbildung 45:	Verteilung des Verkehrsstroms q4 auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr .....	93
Abbildung 46:	Verteilung der Verkehrsströme q1 (links) und q7 (rechts) auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr.....	93
Abbildung 47:	Verteilung des Verkehrsstroms q2 auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der	

---

	theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr .....	94
Abbildung 48:	Verteilung der Verkehrsströme q5 (links) und q8 (rechts) auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr .....	95
Abbildung 49:	Verteilung des Verkehrsstroms q3 auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr .....	96
Abbildung 50:	Verteilung der Verkehrsströme q6 (links) und q9 (rechts) auf den rechten Fahrstreifen der Zufahrt (RA & SV) und den linken Fahrstreifen der Zufahrt (LA) aus Beobachtung und der theoretischen Verteilung bei den Fahrweisen 1 und 2 im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr .....	96
Abbildung 51:	Kalibrierung des Videos anhand der Länge und Ausrichtung einer bekannten Strecke.....	98
Abbildung 52:	Relatives Koordinatensystem aus Kalibrierung .....	98
Abbildung 53:	Objektfenster (inneres Rechteck) und Suchfenster (äußeres Rechteck) um ein Objekt.....	99
Abbildung 54:	Tracking an der rechten Fahrzeugkante .....	100
Abbildung 55:	Tracking an der linken Fahrzeugkante .....	100
Abbildung 56:	Trajektorienerfassung in ‚Kinovea‘ .....	101
Abbildung 57:	Beispielhafte Darstellung der als Tabelle exportierten Trajektorien aus ‚Kinovea‘ .....	102
Abbildung 58:	*.csv-Datei nach Konvertierung.....	103
Abbildung 59:	Grafische Ausgabe der Momentangeschwindigkeiten der einzelnen Trajektorien bezogen auf die absolute Zeit in [ms] .....	104

Abbildung 60:	Darstellung der Datenpunkte in ‚QGIS‘ mit hinterlegten Momentangeschwindigkeiten.....	105
Abbildung 61:	Trajektorien der Fahrzeuge auf den rechten Fahrstreifen der zweistreifigen Zufahrten (RA inkl. SV) .....	106
Abbildung 62:	Sattelzug auf Kreisfahrbahn .....	107
Abbildung 63:	Fahren der ‚Ideallinie‘ bei geringer Verkehrsdichte .....	108
Abbildung 64:	Trajektorien der Fahrzeuge der einstreifigen Zufahrt Z4	108
Abbildung 65:	Trajektorien der Fahrzeuge auf den linken Fahrstreifen der zweistreifigen Zufahrten (LA) .....	109
Abbildung 66:	Trajektorien der vom inneren Fahrstreifen ausfahrenden Fahrzeuge .....	110
Abbildung 67:	Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall von 07:33:40 Uhr bis 07:39:05 Uhr .....	111
Abbildung 68:	Konflikt zwischen einem ausfahrenden Fahrzeug vom inneren Fahrstreifen mit einem (gerade eingefahrenen) Fahrzeug auf dem äußeren Fahrstreifen .....	112
Abbildung 69:	Versetzes Fahren auf der Kreisfahrbahn .....	114
Abbildung 70:	Ablaufschema eines Simulationsexperiments, nach [FGSV, 2006a] .....	116
Abbildung 71:	Darstellung der verschiedenen Kombinationen von Strecken mit unterschiedlicher Anzahl an Fahrstreifen für die Modellierung .....	119
Abbildung 72:	Varianten A (links), B (Mitte) und C (rechts) für die Modellierung einer zweistreifigen Kreisfahrbahn.....	120
Abbildung 73:	Varianten 1 bis 3 (von oben nach unten) für die Modellierung einer zweistreifigen Zufahrt.....	121
Abbildung 74:	Ausschnitt der Variante A.1.3 .....	124
Abbildung 75:	Ausschnitt der Variante B.2.3 .....	124

---

Abbildung 76:	Ablaufdiagramm zur Plausibilitätsprüfung des Basismodells mittels eines Vergleichs der erzeugten Trajektorien aus ‚PTV Vissim‘ und ‚Kinovea‘ in ‚QGIS‘ .....	128
Abbildung 77:	Lage des Referenzpunktes in der Hintergrundkarte und im Netz .....	129
Abbildung 78:	Ausschnitt aus einer *.fzg-Datei .....	129
Abbildung 79:	Potenzieller Einfluss der Perspektive bei der Auswertung der Trajektorien in ‚Kinovea‘ .....	131
Abbildung 80:	Beispielhafte Darstellung der Trajektorien der durch die in ‚QGIS‘ eingelesenen Punkte aus ‚Kinovea‘ für Zufahrt 1, getrennt nach Fahrstreifen der Zufahrt .....	132
Abbildung 81:	Beispielhafte Darstellung der Trajektorien durch die in ‚QGIS‘ eingelesenen Punkte aus ‚PTV Vissim‘, getrennt nach Fahrzeugklassen .....	132
Abbildung 82:	„PTV Vissim“ Basismodell (nur Streckenelemente) .....	134
Abbildung 83:	Detail der Modellierung einer Ausfahrt in „PTV Vissim“ .....	135
Abbildung 84:	„PTV Vissim“ Basismodell (Streckenelemente + Konfliktflächen) .....	136
Abbildung 85:	Ausschnitt „PTV Vissim“ Basismodell (Streckenelemente + Konfliktflächen + Langsamfahrbereiche) .....	137
Abbildung 86:	Routenentscheidungen (in Gelb dargestellt) für Fahrzeugklasse ‚Pkw RA‘ und ‚Lkw‘ .....	138
Abbildung 87:	Routenentscheidungen (in Gelb dargestellt) für Fahrzeugklasse ‚Pkw LA‘ .....	139
Abbildung 88:	Abbildung der Vorfahrtsregelungen über Konfliktflächen (am Beispiel Z2) und Querverkehrsstörungen (am Beispiel A3) .....	141

Abbildung 89:	Vereinfachtes Ablaufschema Simulationsexperiment bei Vorhandensein mehrerer Datensätze in Anlehnung an [FGSV, 2006a] .....	143
Abbildung 90:	Weg-Zeit-Diagramm eines Verkehrsstroms mit Darstellung des Einflussbereichs des Knotenpunkts, des Bildausschnittes sowie der Reisezeitmessung, nach [SCHUCKLIEß et al., 2003; VORTISCH et al., 2020] ..	149
Abbildung 91:	Definition der Messquerschnitte für die Reisezeitmessungen ohne Zufahrten.....	150
Abbildung 92:	Im Basismodell modellierte Verbinder (oben) und zusätzliche Konfliktflächen durch die Optimierung der Verbinder (unten) .....	153
Abbildung 93:	Verteilung der Reisezeiten für q3 (RA) und q9 (RA) bei einer Klassenbreite von 0,5 s.....	154
Abbildung 94:	Verteilung der Reisezeiten für q2 (RA) und q8 (RA) bei einer Klassenbreite von 0,5 s.....	154
Abbildung 95:	Verteilung der Reisezeiten für q2 (LA) und q8 (LA) bei einer Klassenbreite von 0,5 s.....	155
Abbildung 96:	Verteilung der Reisezeiten für q1 (LA) und q7 (LA) bei einer Klassenbreite von 0,5 s.....	155
Abbildung 97:	Box-Whisker-Plots der gemessenen Reisezeiten der Fahrzeuge der rechten Fahrstreifen der Zufahrten getrennt nach Verkehrsströmen.....	156
Abbildung 98:	Box-Whisker-Plots der gemessenen Reisezeiten der Fahrzeuge der linken Fahrstreifen der Zufahrten getrennt nach Verkehrsströmen.....	156
Abbildung 99:	Vergleich der Reisezeiten für q2 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Basismodell.....	158

---

Abbildung 100:	Überlagerte Werte der relativen Häufigkeiten sowie kumulierte Häufigkeiten aus Beobachtung und Simulation für q2 (RA) – Basismodell .....	160
Abbildung 101:	Vergleich der Reisezeiten für q2 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A .....	162
Abbildung 102:	Vergleich der Reisezeiten für q8 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A .....	163
Abbildung 103:	Vergleich der Reisezeiten für q3 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A .....	164
Abbildung 104:	Vergleich der Reisezeiten für q9 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A .....	165
Abbildung 105:	Vergleich der Reisezeiten für q2 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A .....	167
Abbildung 106:	Vergleich der Reisezeiten für q8 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A .....	168
Abbildung 107:	Vergleich der Reisezeiten für q1 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A .....	169
Abbildung 108:	Vergleich der Reisezeiten für q7 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt A .....	171
Abbildung 109:	Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für die Fahrzeuge der linken Fahrstreifen der Zufahrten aus Beobach-	

tung für das Intervall von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr .....	173
Abbildung 110: Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für die Fahrzeuge der rechten Fahrstreifen der Zufahrten aus Beobachtung für das Intervall von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr .....	174
Abbildung 111: Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für die FFE der linken Fahrstreifen der Zufahrten aus Simulation für das Intervall von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr.....	175
Abbildung 112: Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für die FFE der rechten Fahrstreifen der Zufahrten aus Simulation für das Intervall von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr.....	175
Abbildung 113: Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten im Bereich der Zufahrt aus Simulation für das Intervall von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr .....	176
Abbildung 114: Ausbildung der Querverkehrsstörungen im Zuge der Ausfahrten.....	178
Abbildung 115: Vergleich der Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für verschiedene Simulationsläufe bei $MinZeitl = 1,0$ s..	179
Abbildung 116: Fehlende Interaktion der FFE in den Ausfahrten .....	180
Abbildung 117: Vergleich der Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für verschiedene Simulationsläufe bei $MinZeitl = 1,1$ s..	181
Abbildung 118: Vergleich der Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten für verschiedene Simulationsläufe bei $MinZeitl = 1,2$ s..	182
Abbildung 119: Vergleich der Reisezeiten für q2 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt D .....	184
Abbildung 120: Vergleich der Reisezeiten für q8 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt D .....	185

---

Abbildung 121:	Vergleich der Reisezeiten für q1 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt D .....	186
Abbildung 122:	Vergleich der Reisezeiten für q7 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Kalibrierungsschritt D .....	187
Abbildung 123:	Anpassungen der <i>vWunsch</i> im Rahmen des Kalibrierungsschrittes F (links: Kalibrierungsschritt E, rechts: Kalibrierungsschritt F).....	191
Abbildung 124:	Ermittlung der Staulängen für wartepflichtige FFE (Rot = Konfliktfläche der wartepflichtigen FFE, Grün = Konfliktfläche der bevorrechtigten FFE, Schwarz = Visualisierung der Staulänge für den aktuellen Simulationslauf) .....	196
Abbildung 125:	Beobachtete, maximale Rückstaulänge in der Zufahrt Z1 für das Intervall 6 von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr ...	197
Abbildung 126:	Beobachtete, maximale Rückstaulänge in der Zufahrt Z3 für das Intervall 6 von 07:28:14 Uhr bis 07:33:39 Uhr ...	198
Abbildung 127:	Vergleich der Reisezeiten für q2 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung.....	206
Abbildung 128:	Vergleich der Reisezeiten für q8 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung.....	208
Abbildung 129:	Vergleich der Reisezeiten für q3 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung.....	209
Abbildung 130:	Vergleich der Reisezeiten für q9 der Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung.....	210

Abbildung 131: Vergleich der Reisezeiten für q2 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Beobachtung sowie 10 Simulationsläufen – Validierung.....	212
Abbildung 132: Vergleich der Reisezeiten für q8 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung.....	213
Abbildung 133: Vergleich der Reisezeiten für q1 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung.....	215
Abbildung 134: Vergleich der Reisezeiten für q7 der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen aus Video sowie 10 Simulationsläufen – Validierung.....	216
Abbildung 135: Beeinflussung der Rückstaulängen der FEE auf dem linken Fahrstreifen der Zufahrt durch FFE des rechten Fahrstreifens .....	219
Abbildung 136: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrten und der Kreisfahrbahn nach Fahrweise ....	225
Abbildung 137: Maximale Rückstaulängen für die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrten nach Fahrweise .....	226
Abbildung 138: Mittelwert der Fahrzeugverlustzeiten für die FFE der jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrten nach Fahrweise .....	227
Abbildung 139: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z1 bei steigender Verkehrsbelastung.....	230
Abbildung 140: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z1 bei steigender Verkehrsbelastung.....	231
Abbildung 141: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z2 bei steigender Verkehrsbelastung.....	232

---

Abbildung 142:	Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z2 bei steigender Verkehrsbelastung.....	232
Abbildung 143:	Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z4 bei steigender Verkehrsbelastung.....	233
Abbildung 144:	Schematische Darstellung der Entwicklung der Gesamtverkehrsstärke .....	237
Abbildung 145:	Darstellung der ermittelten Wertepaare für die Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn sowie der Zufahrten der Hauptrichtung.....	238
Abbildung 146:	Darstellung der ermittelten Wertepaare für die Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn sowie der Zufahrten der Hauptrichtung (Detail) .....	239
Abbildung 147:	Darstellung der ermittelten Wertepaare für die Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn sowie der Zufahrten der Nebenrichtung .....	240
Abbildung 148:	Darstellung der ermittelten Wertepaare für die Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn sowie der Zufahrten der Nebenrichtung (Detail).....	240
Abbildung 149:	Kapazitätsvergleich von Fahrweise 1 mit Fahrweise 2 im Rahmen des Simulationsexperiments mit ‚PTV Vissim‘.	242
Abbildung 150:	Kapazitätsvergleich von Fahrweise 1 mit dem modifizierten Modell für Fahrweise 1 (FW1mod) und Fahrweise 2 im Rahmen des Simulationsexperiments mit ‚PTV Vissim‘.	243
Abbildung 151:	Entwicklung der möglichen Verkehrsbelastungen der Zufahrten der Hauptrichtung bei Anwendung von Fahrweise 2 .....	244
Abbildung 152:	Kapazitätsvergleich der Berechnungsergebnisse aus ‚PTV Vissim‘ sowie den Berechnungen nach FGSV [2015a] und WU & BRILON [2018] .....	245

A-Abbildung 1: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 1 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 50/50 .....	289
A-Abbildung 2: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 2 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 50/50 .....	290
A-Abbildung 3: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 1 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 60/40 .....	291
A-Abbildung 4: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 2 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 60/40 .....	292
A-Abbildung 5: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 1 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 70/30 .....	293
A-Abbildung 6: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 2 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 70/30 .....	294
A-Abbildung 7: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 1 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 80/20 .....	295
A-Abbildung 8: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 2 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 80/20 .....	296
A-Abbildung 9: Ergebnisse der Knotenpunktzählung für das Intervall 6 .....	298
A-Abbildung 10: Ergebnisse der Knotenpunktzählung für das Intervall 7 .....	299
A-Abbildung 11: Ergebnisse der Knotenpunktzählung für das Intervall 8 .....	300
A-Abbildung 12: Verteilung des Verkehrsstroms q1 im Intervall 6.....	302

---

A-Abbildung 13: Verteilung des Verkehrsstroms q2 im Intervall 6.....	302
A-Abbildung 14: Verteilung des Verkehrsstroms q3 im Intervall 6.....	303
A-Abbildung 15: Verteilung des Verkehrsstroms q4 im Intervall 6.....	303
A-Abbildung 16: Verteilung des Verkehrsstroms q5 im Intervall 6.....	304
A-Abbildung 17: Verteilung des Verkehrsstroms q6 im Intervall 6.....	304
A-Abbildung 18: Verteilung des Verkehrsstroms q7 im Intervall 6.....	305
A-Abbildung 19: Verteilung des Verkehrsstroms q8 im Intervall 6.....	305
A-Abbildung 20: Verteilung des Verkehrsstroms q9 im Intervall 6.....	306
A-Abbildung 21: Verteilung des Verkehrsstroms q10 im Intervall 6.....	306
A-Abbildung 22: Verteilung des Verkehrsstroms q11 im Intervall 6.....	307
A-Abbildung 23: Verteilung des Verkehrsstroms q12 im Intervall 6.....	307
A-Abbildung 24: Verteilung des Verkehrsstroms q10 im Intervall 7.....	308
A-Abbildung 25: Verteilung des Verkehrsstroms q11 im Intervall 7.....	308
A-Abbildung 26: Verteilung des Verkehrsstroms q12 im Intervall 7.....	309
A-Abbildung 27: Verteilung des Verkehrsstroms q1 im Intervall 8.....	310
A-Abbildung 28: Verteilung des Verkehrsstroms q2 im Intervall 8.....	310
A-Abbildung 29: Verteilung des Verkehrsstroms q3 im Intervall 8.....	311
A-Abbildung 30: Verteilung des Verkehrsstroms q4 im Intervall 8.....	311
A-Abbildung 31: Verteilung des Verkehrsstroms q5 im Intervall 8.....	312
A-Abbildung 32: Verteilung des Verkehrsstroms q6 im Intervall 8.....	312
A-Abbildung 33: Verteilung des Verkehrsstroms q7 im Intervall 8.....	313
A-Abbildung 34: Verteilung des Verkehrsstroms q8 im Intervall 8.....	313
A-Abbildung 35: Verteilung des Verkehrsstroms q9 im Intervall 8.....	314
A-Abbildung 36: Verteilung des Verkehrsstroms q10 im Intervall 8.....	314
A-Abbildung 37: Verteilung des Verkehrsstroms q1 im Intervall 8.....	315
A-Abbildung 38: Verteilung des Verkehrsstroms q12 im Intervall 8.....	315
A-Abbildung 39: Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall 6 (RA).....	317
A-Abbildung 40: Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall 6 (LA).....	318

A-Abbildung 41: Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall 7 (RA) .....	319
A-Abbildung 42: Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall 7 (LA) .....	320
A-Abbildung 43: Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall 8 (RA) .....	321
A-Abbildung 44: Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall 8 (LA) .....	322
A-Abbildung 45: Zusammensetzung der Fahrzeugzuflüsse und Fahrzeug- routen [Fz/h] zur Übergabe an ‚PTV Vissim‘ – Fahrweise 0 .....	324
A-Abbildung 46: Zusammensetzung der Fahrzeugzuflüsse und Fahrzeug- routen [Fz/h] zur Übergabe an ‚PTV Vissim‘ – Fahrweise 1 .....	325
A-Abbildung 47: Zusammensetzung der Fahrzeugzuflüsse und Fahrzeug- routen [Fz/h] zur Übergabe an ‚PTV Vissim‘ – Fahrweise 2 .....	326
A-Abbildung 48: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 1 und dem Kreisquerschnitt 1 nach Fahrweise, bei 100 % Gesamtverkehrsbelastung .....	328
A-Abbildung 49. Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 2 und dem Kreisquerschnitt 2 nach Fahrweise, bei 100 % Gesamtverkehrsbelastung .....	328
A-Abbildung 50: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 3 und dem Kreisquerschnitt 3 nach Fahrweise, bei 100 % Gesamtverkehrsbelastung .....	329
A-Abbildung 51: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 4 und dem Kreisquerschnitt 4 nach Fahrweise, bei 100 % Gesamtverkehrsbelastung .....	329
A-Abbildung 52: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 1 und dem Kreisquerschnitt 1 nach Fahrweise, bei 105 % Gesamtverkehrsbelastung .....	330
A-Abbildung 53: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 2 und dem Kreisquerschnitt 2 nach Fahrweise, bei 105 % Gesamtverkehrsbelastung .....	330

---

A-Abbildung 54: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 3 und dem Kreisquerschnitt 3 nach Fahrweise, bei 105 % Gesamtverkehrsbelastung .....	331
A-Abbildung 55: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 4 und dem Kreisquerschnitt 4 nach Fahrweise, bei 105 % Gesamtverkehrsbelastung .....	331
A-Abbildung 56: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 1 und dem Kreisquerschnitt 1 nach Fahrweise, bei 110 % Gesamtverkehrsbelastung .....	332
A-Abbildung 57: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 2 und dem Kreisquerschnitt 2 nach Fahrweise, bei 110 % Gesamtverkehrsbelastung .....	332
A-Abbildung 58: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 3 und dem Kreisquerschnitt 3 nach Fahrweise, bei 110 % Gesamtverkehrsbelastung .....	333
A-Abbildung 59: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 4 und dem Kreisquerschnitt 4 nach Fahrweise, bei 110 % Gesamtverkehrsbelastung .....	333
A-Abbildung 60: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 1 und dem Kreisquerschnitt 1 nach Fahrweise, bei 120 % Gesamtverkehrsbelastung .....	334
A-Abbildung 61: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 2 und dem Kreisquerschnitt 2 nach Fahrweise, bei 120 % Gesamtverkehrsbelastung .....	334
A-Abbildung 62: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 3 und dem Kreisquerschnitt 3 nach Fahrweise, bei 120 % Gesamtverkehrsbelastung .....	335
A-Abbildung 63: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 4 und dem Kreisquerschnitt 4 nach Fahrweise, bei 120 % Gesamtverkehrsbelastung .....	335
A-Abbildung 64: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z1 bei steigender Verkehrsbelastung.....	336

A-Abbildung 65: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z1 bei steigender Verkehrsbelastung.....	336
A-Abbildung 66: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z2 bei steigender Verkehrsbelastung.....	337
A-Abbildung 67: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z2 bei steigender Verkehrsbelastung.....	337
A-Abbildung 68: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z3 bei steigender Verkehrsbelastung.....	338
A-Abbildung 69: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z3 bei steigender Verkehrsbelastung.....	338
A-Abbildung 70: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z3 bei steigender Verkehrsbelastung.....	339
A-Abbildung 71: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z3 bei steigender Verkehrsbelastung.....	339
A-Abbildung 72: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z4 bei steigender Verkehrsbelastung.....	340
A-Abbildung 73: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z4 bei steigender Verkehrsbelastung.....	340
A-Abbildung 74: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z4 bei steigender Verkehrsbelastung.....	341
A-Abbildung 75: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z4 bei steigender Verkehrsbelastung.....	341

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verteilung der Verkehrsströme auf die Haupt-/Nebenrichtung von 60/40 bei einer Gesamtverkehrsstärke von 2000 Fz/h.....	31
Tabelle 2:	Tabellarische Zusammenstellung der Folgerungen aus der theoretischen Betrachtung sowie der daraus resultierenden Fragestellungen bzgl. der Auswirkungen auf die Kapazität, nach [WACHSMANN 2016] .....	34
Tabelle 3:	Grenz-, Folge- und Mindestzeitlücken für die Kreiszufahrttypen an Turbokreisverkehren [FGSV, 2015a] .....	53
Tabelle 4:	Konfliktmatrix mit Parametern für eine Kreisverkehrs-zufahrt und unterschiedlichen Konfigurationen [WU & BRILON, 2018].....	60
Tabelle 5:	Tabellarische Berechnung der Kapazität, Beispiel [WU & BRILON, 2018].....	61
Tabelle 6:	Anzahl der Simulationen je betrachteter Fahrweise .....	72
Tabelle 7:	Übersicht über auswertbare Zeiträume.....	87
Tabelle 8:	Überblick über Videos mit vollständiger Auswertung .....	90
Tabelle 9:	Mögliche Modellierungsvarianten (Grün = untersucht, Rot = nicht untersucht, (x) = Modellierung Zufluss entspricht Modellierung Zufahrt).....	125
Tabelle 10:	Bewertung der verschiedenen Varianten.....	126
Tabelle 11:	Typische Fragestellungen und mögliche Kenngrößen zur Validierung [FGSV, 2006a] .....	145
Tabelle 12:	Differenzen der zurückgelegten Wegelängen der Fahrzeuge der rechten Fahrstreifen.....	152
Tabelle 13:	Differenzen der zurückgelegten Wegelängen der Fahrzeuge der linken Fahrstreifen .....	152

Tabelle 14:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (RA) – Basismodell.....	158
Tabelle 15:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (RA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe) .....	162
Tabelle 16:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (RA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe) .....	163
Tabelle 17:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q3 (RA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe) .....	165
Tabelle 18:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q9 (RA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe) .....	166
Tabelle 19:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (LA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe) .....	167
Tabelle 20:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (LA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe) .....	168
Tabelle 21:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q1 (LA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe) .....	170
Tabelle 22:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q7 (LA) – Kalibrierungsschritt A (100 Simulationsläufe) .....	171
Tabelle 23:	Parameter der Querverkehrsstörungen im Basismodell ..	177

---

Tabelle 24:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (LA) – Kalibrierungsschritt D (100 Simulationsläufe)	184
Tabelle 25:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (LA) – Kalibrierungsschritt D (100 Simulationsläufe)	185
Tabelle 26:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q1 (LA) – Kalibrierungsschritt D (100 Simulationsläufe)	187
Tabelle 27:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q7 (LA) – Kalibrierungsschritt D (100 Simulationsläufe)	188
Tabelle 28:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (LA) – Kalibrierungsschritt E (100 Simulationsläufe)	189
Tabelle 29:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (LA) – Kalibrierungsschritt E (100 Simulationsläufe)	189
Tabelle 30:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q1 (LA) – Kalibrierungsschritt E (100 Simulationsläufe)	190
Tabelle 31:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q7 (LA) – Kalibrierungsschritt E (100 Simulationsläufe)	190
Tabelle 32:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (LA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)	192
Tabelle 33:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (LA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)	192
Tabelle 34:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q1 (LA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)	193

Tabelle 35:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q7 (LA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)	193
Tabelle 36:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (RA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)	194
Tabelle 37:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (RA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)	194
Tabelle 38:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q3 (RA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)	195
Tabelle 39:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q9 (RA) – Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe)	195
Tabelle 40:	Vergleich der maximalen Rückstaulängen der Intervalle 6, 7 und 8.....	199
Tabelle 41:	Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z1, Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe) .....	199
Tabelle 42:	Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z3, Kalibrierungsschritt F (100 Simulationsläufe) .....	200
Tabelle 43:	Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z1, Kalibrierungsschritt G (100 Simulationsläufe) .....	200
Tabelle 44:	Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z3, Kalibrierungsschritt G (100 Simulationsläufe) .....	201
Tabelle 45:	Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z1, Kalibrierungsschritt H (100 Simulationsläufe) .....	201
Tabelle 46:	Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z3, Kalibrierungsschritt H (100 Simulationsläufe) .....	202

---

Tabelle 47:	Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z1, Kalibrierungsschritt I (100 Simulationsläufe) .....	202
Tabelle 48:	Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z3, Kalibrierungsschritt I (100 Simulationsläufe) .....	202
Tabelle 49:	Werte für StauLngMax für die FFE der linken Fahrstreifen (100 Simulationsläufe) .....	203
Tabelle 50:	Werte für StauLngMax für die FFE der rechten Fahrstreifen (100 Simulationsläufe) .....	204
Tabelle 51:	Abweichung der Anzahl an Fahrzeugen zwischen Simulation (100 Simulationsläufe) und Beobachtung (Gesamtverkehrsstärke).....	204
Tabelle 52:	Abweichung der Anzahl an Fahrzeugen zwischen Simulation (100 Simulationsläufe) und Beobachtung (einzelne Zufahrten) .....	205
Tabelle 53:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (RA) – Validierung (100 Simulationsläufe) .....	207
Tabelle 54:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (RA) – Validierung (100 Simulationsläufe) .....	208
Tabelle 55:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q3 (RA) – Validierung (100 Simulationsläufe) .....	210
Tabelle 56:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q9 (RA) – Validierung (100 Simulationsläufe) .....	211
Tabelle 57:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q2 (LA) – Validierung (100 Simulationsläufe) .....	212
Tabelle 58:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q8 (LA) – Validierung (100 Simulationsläufe) .....	214

Tabelle 59:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q1 (LA) – Validierung (100 Simulationsläufe) .....	215
Tabelle 60:	Vergleich der statistischen Kennwerte der Reisezeiten für q7 (LA) – Validierung (100 Simulationsläufe) .....	216
Tabelle 61:	Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z1 (LA) – Validierung (100 Simulationsläufe) .....	217
Tabelle 62:	Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z3 (LA) – Validierung (100 Simulationsläufe) .....	218
Tabelle 63:	Vergleich der maximalen Rückstaulängen aus Beobachtung und Simulation für Zufahrt Z3 (LA) ohne Einfluss der FFE des rechten Fahrstreifens – Validierung (100 Simulationsläufe) .....	220
Tabelle 64:	Abweichung der Anzahl an Fahrzeugen zwischen Simulation (100 Simulationsläufe) und Beobachtung (Gesamtverkehrsstärke) im Zuge der Validierung.....	220
Tabelle 65:	Abweichung der Anzahl an Fahrzeugen zwischen Simulation (100 Simulationsläufe) und Beobachtung (einzelne Zufahrten) im Zuge der Validierung .....	221
Tabelle 66:	Detektierte Anzahl an FFE in den Zufahrten bei Steigerung der Verkehrsbelastung (100 Simulationsläufe) .....	229
Tabelle 67:	Abweichung der Ergebnisse der Berechnungen nach FGSV [2015a] zu den Ergebnissen des Simulationsexperiments (100 Simulationsläufe).....	245
Tabelle 68:	Abweichung der Ergebnisse der Berechnungen nach WU & BRILON [2018] zu den Ergebnissen des Simulationsexperiments (100 Simulationsläufe).....	246

# Literaturverzeichnis

ACS - Automobilclub der Schweiz (o.D.). *Kreisel fahren.*

[http://www.acs.ch/ch-de/pdf-public/verkehrssicherheit/Routier\\_Kreisel\\_Flyer\\_de.pdf](http://www.acs.ch/ch-de/pdf-public/verkehrssicherheit/Routier_Kreisel_Flyer_de.pdf), zuletzt geprüft am 11.03.2020.

ADAC - Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V., Ressort Verkehr (Hrsg.) (2005). *Der Kreisverkehr.*

[https://www.adac.de/\\_mmm/pdf/rv\\_kreisverkehr\\_broschuer\\_e\\_0205\\_252126.pdf](https://www.adac.de/_mmm/pdf/rv_kreisverkehr_broschuer_e_0205_252126.pdf), zuletzt geprüft am 04.03.2020.

APR - Association Prévention Routière (2017). *Bien emprunter un giratoire.* [https://www.preventionroutiere.asso.fr/wp-content/uploads/2017/02/APR\\_Memento\\_Giratoire\\_WEB\\_1712.pdf](https://www.preventionroutiere.asso.fr/wp-content/uploads/2017/02/APR_Memento_Giratoire_WEB_1712.pdf), zuletzt geprüft am 18.3.2020.

Bayerische Straßenbauverwaltung (2023). *BAYSIS - Bayrisches Straßeninformationssystem.* [www.basisbayern.de](http://www.basisbayern.de), zuletzt geprüft am 06.11.2023.

Brilon, W. (1988). Leistungsfähigkeit von Kreisverkehrsplätzen: Ein Zwischenbericht. *Straßenverkehrstechnik*(5), 167–175.

Brilon, W. & Bäumer, H. (Hrsg.). (2004). *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik: Bd. 876. Überprüfung von Kreisverkehren mit zweistreifig markierter oder einstreifig markierter, aber zweistreifig befahrbarer Kreisfahrbahn: Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 02.198/2000/GGB des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.* DMB-Bundesdruckerei.

- Brilon, W. & Geppert, A. (2010). *Verkehrsqualität an zweistufigen Kreisverkehren unter Berücksichtigung der Abbiegebeziehungen und aktueller Grenz- und Folgezeitlücken: Schlussbericht zum FE 02.278/2006/ARB der Bundesanstalt für Straßenwesen.*
- Brilon, W. & Geppert, A. (2015a). Kapazität von großen Kreisverkehren: Turbokreisverkehre. *Straßenverkehrstechnik*(02), S. 81–90.
- Brilon, W. & Geppert, A. (2015b). Kapazität von größeren Kreisverkehren: Zweistufig befahrbare Kreisverkehre. *Straßenverkehrstechnik*(01), S. 13–21.
- Brilon, W. & Geppert, A. (2015c). *Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an zweistufig befahrbaren Kreisverkehren und Turbokreisverkehren. Forschung - Strassenbau und Verkehrstechnik: Bd. 1112.* Wirtschaftsverlag NW.
- Brilon, W., Großmann, M. & Blanke, H. (1994). *Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Straßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik: Heft 669.*
- Brilon, W. & Wu, N. (2008). Kapazität von Kreisverkehren - Aktualisierung. *Straßenverkehrstechnik*, 2008(05), S. 280–288.
- Brilon, W. & Wu, N. (09.05.2017). *Roundabout Capacity Analysis Based on Conflict Technique.* 5th International Conference on Roundabouts. [http://teachamerica.com/RAB17/RAB175C\\_Brilon/index.htm](http://teachamerica.com/RAB17/RAB175C_Brilon/index.htm), zuletzt geprüft am 19.07.2022.
- Straßenverkehrs-Ordnung (2013). [https://www.gesetze-im-internet.de/stvo\\_2013/StVO.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/StVO.pdf).

- 
- Charmant, J. & Mitwirkende (2021). *Kinovea (Software), Version 0.9.5.*  
<https://www.kinovea.org>, zuletzt geprüft am 23.02.2024.
- EUROSTAT - Geoportal of the European Commission (20.03.2018). *Nomenclature of Territorial Units for Statistics (NUTS) 2016 - Statistical Units - Data set.* <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/gisco/geodata/reference-data/administrative-units-statistical-units/nuts#nuts16>, zuletzt geprüft am 10.03.2020.
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2006a).  
*Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation: Grundlagen und Anwendungen, Ausgabe 2006* (FGSV 388). FGSV Verlag GmbH.
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2006b).  
*Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren, Ausgabe 2006* (FGSV 242). FGSV Verlag GmbH.
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007).  
*Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt): Ausgabe 2006* (FGSV 200). FGSV Verlag GmbH.
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2009).  
*Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS): Ausgabe 2001/Fassung2009* (FGSV 299). FGSV Verlag GmbH.
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012).  
*Empfehlungen für Verkehrserhebungen (EVE): Ausgabe 2012* (FGSV 125). FGSV Verlag GmbH.

- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2013).  
*Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL): Ausgabe 2012*  
(FGSV 201). FGSV Verlag GmbH.
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2015a).  
*Arbeitspapier Turbokreisverkehre: Ausgabe 2015* (FGSV 242/1).  
FGSV Verlag GmbH.
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2015b).  
*Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS),*  
*Ausgabe 2015* (FGSV 299). FGSV Verlag GmbH.
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2020a).  
*Begriffsbestimmungen für das Straßen- und Verkehrswesen*  
(BBSV) (FGSV 005/1). FGSV Verlag GmbH.
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2020b).  
*Richtlinien für Bemessungsfahrzeuge und Schleppkurven zur*  
*Überprüfung der Befahrbarkeit von Verkehrsflächen (RBSV)*  
(FGSV 287). FGSV Verlag GmbH.
- Geistefeldt, J., Giuliani, S., Busch, F., Schendzielorz, T., Haug, A., Vor-  
tisch, P., Leyn, U. & Trapp, R. (2017). *HBS-konforme Simulation*  
*des Verkehrsablaufs auf Autobahnen. Berichte der Bundesanstalt*  
*für Straßenwesen Verkehrstechnik: Heft V 279.* Fachverlag NW in  
der Carl Schünemann Verlag GmbH.
- Grabe, W. (1954). *Leistungsermittlung von nicht lichtsignalgesteuerten*  
*Knotenpunkten des Straßenverkehrs. Forschungsarbeiten aus*  
*dem Straßenwesen: Heft 11.* Kirschbaum Verlag.
- Graf, M. (2021). *Bewegungsplanung für automatisierte Fahrzeuge in*  
*strukturierten Umgebungen unter Nutzung von Fahrermodellen*

- 
- und kontinuierlicher Optimierung.* <https://oparu.ulm.de/xmlui/handle/123456789/40191>, zuletzt geprüft am 29.09.2024.
- Harders, J. (1968). *Die Leistungsfähigkeit nicht signalgeregelter städtischer Verkehrsknoten. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Forschungsberichte: Bd. 76.* Bundesministerium für Verkehr Abteilung Straßenbau.
- Jiang, H., Shen, Q., Li, A. & Yin, C. (2024). A review of traffic behaviour and intelligent driving at roundabouts based on a microscopic perspective. *Transportation Safety and Environment*, 6(3), Artikel tdad031. <https://doi.org/10.1093/tse/tdad031>
- Krajewski, R., Moers, T. & Bock, J. (2020). *round - The Roundabouts Drone Dataset.* Institute for Automotive Engineering. <https://levelxdata.com/round-dataset/>, zuletzt geprüft am 29.09.2024.
- Krajewski, R., Moers, T., Bock, J., Vater, L. & Eckstein, L. (2020). The round Dataset: A Drone Dataset of Road User Trajectories at Roundabouts in Germany. In IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.), *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (S. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITSC45102.2020.9294728>
- Lamprecht, A., Steffen, D., Haecker, J. & Graichen, K. (2021). Potential der modellprädiktiven Regelung für Fahrsimulatoren. *at - Automatisierungstechnik*(Bd. 69, Heft 2), S. 155–170. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/auto-2020-0090/html>.
- Lindenmann, H. P., Spacek, P., Leemann, N., Belopitov, I., Shojaati, M., Brilon, W. & Geppert, A. (2009). *Leistungsfähigkeit zweistreifiger*

- Kreisel: Forschungsauftrag VSS 2005/301 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleut. UVEK - Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation Bundesamt für Strassen. [http://archiv.ift.ethz.ch/iv/research/2str\\_kreisel/vss2005301.pdf](http://archiv.ift.ethz.ch/iv/research/2str_kreisel/vss2005301.pdf), zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- National Research Council. (2016). *Highway Capacity Manual: A guide for multimodal mobility analysis* (6th edition). Transportation Research Board (TRB).
- Noack, J. (2019). *Kalibrierung von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationsmodellen verschiedener Kreisverkehrstypen in VISSIM anhand empirisch ermittelter Daten* [Masterarbeit]. Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, Karlsruhe.
- OpenStreetMap Foundation (2020). *OpenStreetMap Datenbank: Ergebnisse des tags junction=roundabout*. Abruf über QGIS 3.12.0, Add-In: Quick OSM. <https://www.openstreetmap.org>, zuletzt geprüft am 20.3.2020.
- Popp, C. (2023). *Simultaner Safety-Check von Trajektorien beim Automatisierten Fahren im Urbanen Verkehr*. <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/23223/>.
- Prassas, E. S. & P. Roess, R. (2020). *The Highway Capacity Manual: A Conceptual and Research History Volume 2: Signalized and Unsignalized Intersections* (1st ed. 2020). Springer eBook Collection: Bd. 12. Springer International Publishing; Imprint Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34480-1>
- PTV Group. (2024). *Handbuch PTV Vissim 2024*.

- 
- Republik Portugal (2016). *Codigó da Estrada: Straßenverkehrsordnung Portugal*. Autoridade Nacional Segurança Rodoviária.  
<http://www.ansr.pt/SegurancaRodoviaria/Codigo-DaEstrada/Documents/C%C3%B3digo%20da%20Estrada.pdf>, zuletzt geprüft am 16.03.2020.
- Roess, R. P. & Prassas, E. S. (2014). *The Highway Capacity Manual: Volume 1: Uninterrupted Flow* (1st ed.). Springer Tracts on Transportation and Traffic Ser: v.5. Springer International Publishing AG.
- Sadek, A. W., Gagnon, C., Touchette, A. & Smith, M. (2008). Calibration Potential of Common Analytical and Microsimulation Roundabout Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2071(1), S. 77–86.  
<https://doi.org/10.3141/2071-10>
- Samandar, S. M., Chun, G., Yang, G., Chase, T., Rouphail, N. M. & List, G. F. (2022). Capitalizing on Drone Videos to Calibrate Simulation Models for Signalized Intersections and Roundabouts. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2676(12), S. 96–111.  
<https://doi.org/10.1177/03611981221096120>
- Schnabel, W., Lohse, D. & Knote, T. (Hrsg.). (2011). *Straßenverkehrstechnik* (3., vollständig überarb. Aufl., Bd. 1). Beuth; Kirschbaum.
- Schuckließ, W., Baier, M. & Baur, O. (2003). Maß für die Qualität des Verkehrsablaufs an Kreisverkehren – Wartezeit, Haltezeit oder Verlustzeit? *Perspektiven für das Straßenwesen, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau*(43).

- Shortle, J. F., Thompson, J. M., Gross, D. & Harris, C. M. (2018). *Fundamentals of Queueing Theory*. John Wiley & Sons, Inc.  
<https://doi.org/10.1002/9781119453765>
- Siegloch, W. (1973). *Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 1972. *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik: Bd. 154*. Bundesministerium für Verkehr Abteilung Strassenbau.
- Stuwe, B. (1992). *Untersuchung der Leistungsfähigkeit und Verkehrssicherheit an deutschen Kreisverkehrsplätzen. Schriftenreihe / Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum: Bd. 10*.
- Sukkenik, P. (05.06.2024). Interview durch J. Wachsmann.
- Treiber, M. & Kesting, A. (2010). *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Springer-Lehrbuch. Springer.
- Vereinigtes Königreich Großbritannien und Nordirland (20.08.2019). *The Highway Code: Straßenverkehrsordnung Großbritannien*. Department for Transport UK. <https://www.gov.uk/guidance/the-highway-code/using-the-road-159-to-203>, zuletzt geprüft am 10.03.2020.
- Vortisch, P., Buck, S., Leyn, U., Baier, M., Schuckließ, W., Schimpf, M. & Schmotz, M. (2020). *Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Verkehrstechnik: V324*. Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH.
- Wachsmann, J. (2016). *Entwicklung einer Methodik zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von zweistreifigen Kreisverkehrsplätzen unter*

---

*Betrachtung verschiedener europäischer Verkehrsregelungen*  
[Masterarbeit]. Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft,  
Karlsruhe.

- Wachsmann, J. & Riel, J. (2021). Internationale Verkehrsregelungen an zweistreifigen Kreisverkehren und deren Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit. In FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), *FGSV: 002/127, Tagungsbeiträge zur HEUREKA' 21: Optimierung in Verkehr und Transport*. FGSV Verlag.
- Wolff, G. (09.05.2021). *Karlsruhe: Wie ein altes Kunstwerk am großen Bulacher Kreisel neu zur Geltung kommt.* <https://bnn.de/karlsruhe/karlsruhe-stadt/kreisel-karlsruhe-bulach-kunstwerk-stadtteil>, zuletzt geprüft am 10.05.2021.
- Wu, N. (1997a). *Allgemeine Berechnungsprozeduren für die Leistungsfähigkeit an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage. Arbeitsblätter des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum: Bd. 12.*
- Wu, N. (1997b). *Eine universelle Formel für Berechnung der Kapazität von Kreisverkehrsplätzen. Arbeitsblätter des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum: Bd. 13.*
- Wu, N. & Brilon, W. (2018). Total Capacity of Roundabouts Analyzed by a Conflict Technique. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(15), 9–22.  
<https://doi.org/10.1177/0361198118788171>
- XMS eXpert Media Solutions. (2023). *Drohnenvideos 'Pullacher Kreisel'* vom 16.11.2023.

# **Anhang**

---

# Anhangsverzeichnis

Anhang 1	Berechnungen nach WU & BRILON [2018] .....	288
Anhang 2	Ergebnisse der Knotenpunktzählung.....	297
Anhang 3	Vergleich der Knotenpunktzählung mit den Fahrweisen 1 und 2.....	301
Anhang 4	Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten (Verkehrs- untersuchung).....	316
Anhang 5	Übergabe der Fahrzeugzuflüsse und Fahrzeugrouten an ,PTV Vissim‘ .....	323
Anhang 6	Ergebnisse des Simulationsexperiments zu Kapitel 8.1 und 8.2.....	327

## **Anhang 1 Berechnungen nach WU & BRILON [2018]**

		Kreisfährbahn						Zufahrt		FG	
Zufahrt	Ausfahrt	Stromabwärts			$f_{imp+1}$	x	q	c	x	q	c
		q	$c^*$	$n_{+1}$							
1	Ausfahrt I	342	1640	1	0,98502	1615	0,21118	0	-999	0,00	0
	Ausfahrt O	1028	1338	1	0,96758	1295	0,7938	685	1397	0,49	0
Zufahrt li		342	1640	3	0,99992	1640	0,2085	171	613	0,28	0
Zufahrt re		343	1640	3	0,75207	1233	0,2782	514	836	0,61	0
2	Ausfahrt I	342	1640	1	0,98502	1615	0,21118	0	-999	0,00	0
	Ausfahrt O	1028	1338	1	0,96758	1295	0,7938	685	1397	0,49	0
Zufahrt li		342	1640	3	0,99992	1640	0,2085	171	613	0,28	0
Zufahrt re		343	1640	3	0,75207	1233	0,2782	514	836	0,61	0
3	Ausfahrt I	342	1640	1	0,98502	1615	0,21118	0	-999	0,00	0
	Ausfahrt O	1028	1338	1	0,96758	1295	0,7938	685	1397	0,49	0
Zufahrt li		342	1640	3	0,99992	1640	0,2085	171	613	0,28	0
Zufahrt re		343	1640	3	0,75207	1233	0,2782	514	836	0,61	0
4	Ausfahrt I	342	1640	1	0,98502	1615	0,21118	0	-999	0,00	0
	Ausfahrt O	1028	1338	1	0,96758	1295	0,7938	685	1397	0,49	0
Zufahrt li		342	1640	3	0,99992	1640	0,2085	171	613	0,28	0
Zufahrt re		343	1640	3	0,75207	1233	0,2782	514	836	0,61	0
1	Ausfahrt I	342	1640	1	0,98502	1615	0,21118	0	-999	0,00	0
	Ausfahrt O	1028	1338	1	0,96758	1295	0,7938	685	1397	0,49	0
								max	0,79		0,61

A-Abbildung 1: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 1 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 50/50

Zufahrt	Kreisfahrdahn			Stromabwärts			f <sub>imp-1</sub>			Zufahrt			FG	
	q	C*	n <sub>1</sub>	q	C	x	q	C	x	q	C	x	q	max
1 Ausfahrt I	731	1610	1	0,87949	1416	0,5162	0	-999	0,00	0	0	0,00	0	
Ausfahrt O	731	1397	1	1,00000	1397	0,5233	731	1397	0,52	0	0	0,00	0	
Zufahrt li	731	1640	3	0,98157	1610	0,4540	548	549	1,00	0	0	0,00	0	
Zufahrt re	0	1640	3	0,98000	1607	0,0000	183	1033	0,18	0	0	0,00	0	
2 Ausfahrt I	731	1610	1	0,87949	1416	0,5162	0	-999	0,00	0	0	0,00	0	
Ausfahrt O	731	1397	1	1,00000	1397	0,5233	731	1397	0,52	0	0	0,00	0	
Zufahrt li	731	1640	3	0,98157	1610	0,4540	548	549	1,00	0	0	0,00	0	
Zufahrt re	0	1640	3	0,98000	1607	0,0000	183	1033	0,18	0	0	0,00	0	
3 Ausfahrt I	731	1610	1	0,87949	1416	0,5162	0	-999	0,00	0	0	0,00	0	
Ausfahrt O	731	1397	1	1,00000	1397	0,5233	731	1397	0,52	0	0	0,00	0	
Zufahrt li	731	1640	3	0,98157	1610	0,4540	548	549	1,00	0	0	0,00	0	
Zufahrt re	0	1640	3	0,98000	1607	0,0000	183	1033	0,18	0	0	0,00	0	
4 Ausfahrt I	731	1610	1	0,87949	1416	0,5162	0	-999	0,00	0	0	0,00	0	
Ausfahrt O	731	1397	1	1,00000	1397	0,5233	731	1397	0,52	0	0	0,00	0	
Zufahrt li	731	1640	3	0,98157	1610	0,4540	548	549	1,00	0	0	0,00	0	
Zufahrt re	0	1640	3	0,98000	1607	0,0000	183	1033	0,18	0	0	0,00	0	
1 Ausfahrt I	731	1610	1	0,87949	1416	0,5162	0	-999	0,00	0	0	0,00	0	
Ausfahrt O	731	1397	1	1,00000	1397	0,5233	731	1397	0,52	0	0	0,00	0	

A-Abbildung 2: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 2 nach WU &amp; BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 50/50

		Kreisfahrbahn						Zufahrt		FG	
Zufahrt		q	C*	n <sub>i+1</sub>	f <sub>i,mp+1</sub>	C	x	q	C	x	q
1	Ausfahrt I	322	1640	1	0,98726	1619	0,1989	0	-999	0,00	0
	Ausfahrt O	1021	1345	1	0,98957	1331	0,7671	806	1397	0,58	0
Zufahrt li		322	1640	3	0,99934	1640	0,1963	161	678	0,24	0
Zufahrt re		215	1640	3	0,71928	1180	0,1822	645	911	0,71	0
2	Ausfahrt I	322	1640	1	0,98726	1619	0,1989	0	-999	0,00	0
	Ausfahrt O	1021	1354	1	0,93050	1260	0,8103	537	1397	0,38	0
Zufahrt li		322	1640	3	0,99934	1640	0,1963	161	559	0,29	0
Zufahrt re		484	1640	3	0,79840	1309	0,3697	376	753	0,50	0
3	Ausfahrt I	322	1640	1	0,98726	1619	0,1989	0	-999	0,00	0
	Ausfahrt O	1021	1345	1	0,98957	1331	0,7671	806	1397	0,58	0
Zufahrt li		322	1640	3	0,99934	1640	0,1963	161	678	0,24	0
Zufahrt re		215	1640	3	0,71928	1180	0,1822	645	911	0,71	0
4	Ausfahrt I	322	1640	1	0,98726	1619	0,1989	0	-999	0,00	0
	Ausfahrt O	1021	1354	1	0,93050	1260	0,8103	537	1397	0,38	0
Zufahrt li		322	1640	3	0,99934	1640	0,1963	161	559	0,29	0
Zufahrt re		484	1640	3	0,79840	1309	0,3697	376	753	0,50	0
1	Ausfahrt I	322	1640	1	0,98726	1619	0,1989	0	-999	0,00	0
	Ausfahrt O	1021	1345	1	0,98957	1331	0,7671	806	1397	0,58	0
							max	0,81		0,71	

A-Abbildung 3: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 1 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 60/40

Zufahrt	Kreisfahrbahn				Stromabwärts				Zufahrt				FG	
	q	$c^*$	$n_1$	$f_{imp+1}$	x	C	x	q	C	x	q	x	max	max
1 Ausfahrt I	543	1574	1	0,94228	1483	0,3661	0	-999	0,00	0,00	-999	0,00	0	0
Ausfahrt O	814	1397	1	1,00000	1397	0,58227	814	1397	0,58	0,58	1,00	0,00	0	0
Zufahrt li	543	1640	3	0,95968	1574	0,3450	651	652	1,00	0,16	0,16	0,00	0	0
Zufahrt re	0	1640	3	0,99668	1635	0,00000	163	1033	0,16	0,16	0,16	0,00	0	0
2 Ausfahrt I	814	1636	1	0,84600	1384	0,5882	0	-999	0,00	0,00	-999	0,00	0	0
Ausfahrt O	543	1397	1	1,00000	1397	0,3887	543	1397	0,39	0,39	0,39	0,00	0	0
Zufahrt li	814	1640	3	0,99769	1636	0,4976	380	503	0,76	0,76	0,76	0,00	0	0
Zufahrt re	0	1640	3	0,96170	1577	0,00000	163	1033	0,16	0,16	0,16	0,00	0	0
3 Ausfahrt I	543	1574	1	0,94228	1483	0,3661	0	-999	0,00	0,00	-999	0,00	0	0
Ausfahrt O	814	1397	1	1,00000	1397	0,58227	814	1397	0,58	0,58	1,00	0,00	0	0
Zufahrt li	543	1640	3	0,95948	1574	0,3450	651	652	1,00	0,16	0,16	0,00	0	0
Zufahrt re	0	1640	3	0,99668	1635	0,00000	163	1033	0,16	0,16	0,16	0,00	0	0
4 Ausfahrt I	814	1636	1	0,84600	1384	0,5882	0	-999	0,00	0,00	-999	0,00	0	0
Ausfahrt O	543	1397	1	1,00000	1397	0,3887	543	1397	0,39	0,39	0,39	0,00	0	0
Zufahrt li	814	1640	3	0,99769	1636	0,4976	380	503	0,76	0,76	0,76	0,00	0	0
Zufahrt re	0	1640	3	0,96170	1577	0,00000	163	1033	0,16	0,16	0,16	0,00	0	0
1 Ausfahrt I	543	1574	1	0,94228	1483	0,3661	0	-999	0,00	0,00	-999	0,00	0	0
Ausfahrt O	814	1397	1	1,00000	1397	0,58227	814	1397	0,58	0,58	1,00	0,00	0	0

A-Abbildung 4: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 2 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 60/40

		Kreisfährbahn				Stromabwärts				Zufährt				FG	
Zufahrt		q	c*	n <sub>+1</sub>	f <sub>mp+1</sub>	x	x	q	c	x	x	q	q	q	q
1	Ausfahrt I	268	1640	1	0,99221	1627	0,1647	0	-999			0,00	0		
	Ausfahrt O	1008	1346	1	0,99731	1342	0,7511	893	1397	0,64	0,64	0			
Zufahrt li		268	1640	3	0,99998	1640	0,1634	134	747	0,18	0,18	0			
Zufahrt re		115	1640	3	0,63860	1047	0,1098	759	968	0,78	0,78	0			
2	Ausfahrt I	268	1640	1	0,99221	1627	0,1647	0	-999	0,00	0,00	0			
	Ausfahrt O	1008	1367	1	0,87279	1193	0,8449	383	1397	0,27	0,27	0			
Zufahrt li		268	1640	3	0,99998	1640	0,1634	134	515	0,26	0,26	0			
Zufahrt re		625	1640	3	0,82247	1349	0,4633	249	667	0,37	0,37	0			
3	Ausfahrt I	268	1640	1	0,99221	1627	0,1647	0	-999	0,00	0,00	0			
	Ausfahrt O	1008	1346	1	0,99731	1342	0,7511	893	1397	0,64	0,64	0			
Zufahrt li		268	1640	3	0,99998	1640	0,1634	134	747	0,18	0,18	0			
Zufahrt re		115	1640	3	0,63860	1047	0,1098	759	968	0,78	0,78	0			
4	Ausfahrt I	268	1640	1	0,99221	1627	0,1647	0	-999	0,00	0,00	0			
	Ausfahrt O	1008	1367	1	0,87279	1193	0,8449	383	1397	0,27	0,27	0			
Zufahrt li		268	1640	3	0,99998	1640	0,1634	134	515	0,26	0,26	0			
Zufahrt re		625	1640	3	0,82247	1349	0,4633	249	667	0,37	0,37	0			
1	Ausfahrt I	268	1640	1	0,99221	1627	0,1647	0	-999	0,00	0,00	0			
	Ausfahrt O	1008	1346	1	0,99731	1342	0,7511	893	1397	0,64	0,64	0			
									max				0,84		0,78

A-Abbildung 5: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 1 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 70/30

Zufahrt	Kreisfahrbahn			Stromabwärts			Zufahrt			FG		
	q	C*	n <sub>1</sub>	f <sub>mpa1</sub>	C	x	q	C	x	q	C	x
1 Ausfahrt I	375	1512	1	0,97617	1476	0,2541	0	0	-999	0,00	0	0
Ausfahrt O	875	1397	1	1,00000	1397	0,6263	875	1397	0,63	0,63	0	0
Zufahrt li	375	1640	3	0,92205	1512	0,2480	744	742	1,00	0	0	0
Zufahrt re	0	1640	3	0,99655	1639	0,00000	131	1033	0,13	0	0	0
2 Ausfahrt I	875	1640	1	0,81431	1335	0,6554	0	0	-999	0,00	0	0
Ausfahrt O	375	1397	1	1,00000	1397	0,2684	375	1397	0,27	0,27	0	0
Zufahrt li	875	1640	3	0,99795	1640	0,5335	244	468	0,52	0,52	0	0
Zufahrt re	0	1640	3	0,94074	1543	0,00000	131	1033	0,13	0	0	0
3 Ausfahrt I	375	1512	1	0,97617	1476	0,2541	0	0	-999	0,00	0	0
Ausfahrt O	875	1397	1	1,00000	1397	0,6263	875	1397	0,63	0,63	0	0
Zufahrt li	375	1640	3	0,92205	1512	0,2480	744	742	1,00	0,52	0	0
Zufahrt re	0	1640	3	0,99655	1639	0,00000	131	1033	0,13	0,13	0	0
4 Ausfahrt I	875	1640	1	0,81431	1335	0,6554	0	0	-999	0,00	0	0
Ausfahrt O	375	1397	1	1,00000	1397	0,2684	375	1397	0,27	0,27	0	0
Zufahrt li	875	1640	3	0,99795	1640	0,5335	244	468	0,52	0,52	0	0
Zufahrt re	0	1640	3	0,94074	1543	0,00000	131	1033	0,13	0,13	0	0
1 Ausfahrt I	375	1512	1	0,97617	1476	0,2541	0	0	-999	0,00	0	0
Ausfahrt O	875	1397	1	1,00000	1397	0,6263	875	1397	0,63	0,63	0	0
max												
										0,66		1,00

A-Abbildung 6: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 2 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 70/30

		Kreisfährbahn						Zufahrt		FG		
Zufahrt		q	$c^*$	$n_{+1}$	Stromabwärts		$f_{imp+1}$	x	q	c	x	q
1	Ausfahrt I	188	1640	1	0,99699	1635	0,1150	0	-999	0,00	0,00	0
	Ausfahrt O	990	1363	1	0,99965	1363	0,7263	943	1397	0,68	0,12	0
2	Zufahrt li	188	1640	3	1,00000	1640	0,1146	94	817	1006	0,84	0
	Zufahrt re	47	1640	3	0,55967	918	0,0512	849	0,00	-999	0,00	0,00
3	Ausfahrt I	188	1640	1	0,99699	1635	0,1150	0	1397	0,17	0,17	0
	Ausfahrt O	990	1401	1	0,80962	1134	0,8730	235	478	0,20	0,20	0
4	Zufahrt li	188	1640	3	1,00000	1640	0,1146	94	817	588	0,24	0
	Zufahrt re	755	1640	3	0,85503	1402	0,5385	141	0,00	-999	0,00	0,00
5	Ausfahrt I	188	1640	1	0,99699	1635	0,1150	0	1397	0,68	0,68	0
	Ausfahrt O	990	1363	1	0,99965	1363	0,7263	943	0,00	0,00	0,00	0,00
6	Zufahrt li	188	1640	3	1,00000	1640	0,1146	94	817	0,12	0,12	0
	Zufahrt re	47	1640	3	0,55967	918	0,0512	849	1006	0,84	0,00	0
7	Ausfahrt I	188	1640	1	0,99699	1635	0,1150	0	-999	0,00	0,00	0
	Ausfahrt O	990	1401	1	0,80962	1134	0,8730	235	478	0,20	0,20	0
8	Zufahrt li	188	1640	3	1,00000	1640	0,1146	94	817	588	0,24	0
	Zufahrt re	755	1640	3	0,85503	1402	0,5385	141	0,00	-999	0,00	0,00
9	Ausfahrt I	188	1640	1	0,99699	1635	0,1150	0	1397	0,68	0,68	0
	Ausfahrt O	990	1363	1	0,99965	1363	0,7263	943	0,00	0,00	0,00	0,00
								max		0,87	0,84	

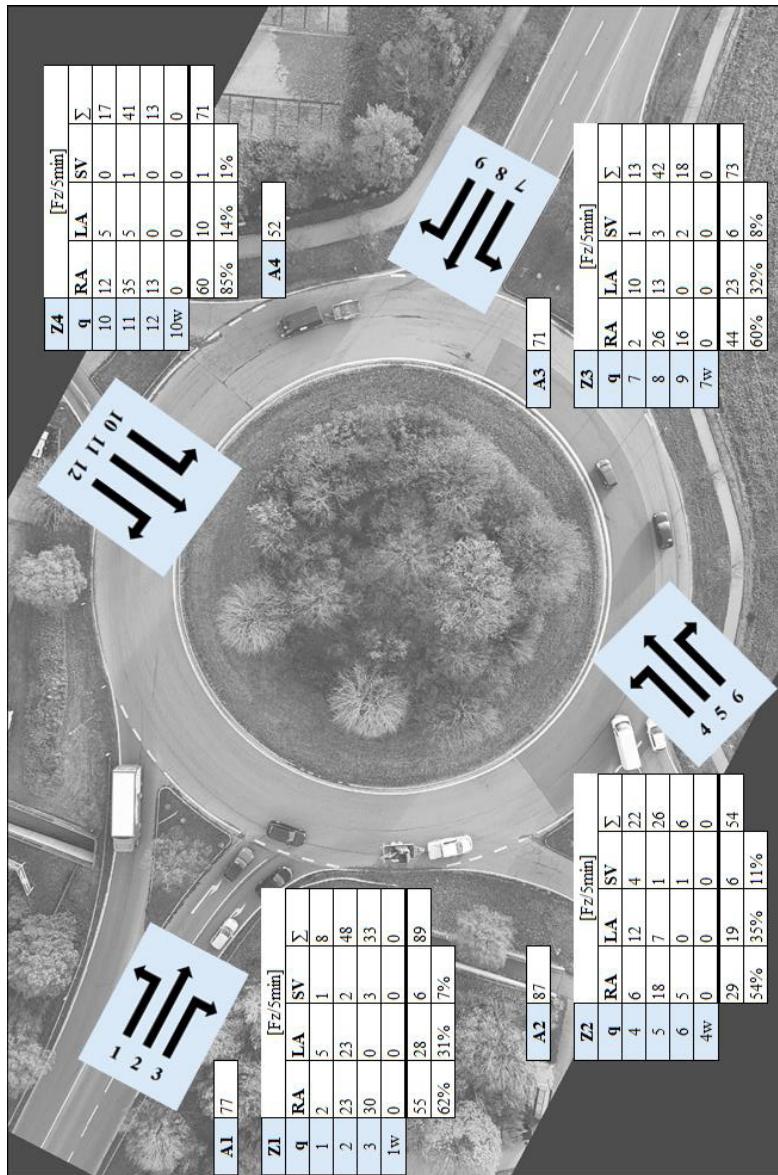
A-Abbildung 7: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 1 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 80/20

Zufahrt	Kreisfahrbahn				Stromabwärts				Zufahrt				FG	
	q	c*	n <sub>1</sub>	f <sub>imp+1</sub>	x	c	x	q	c	x	q	x	max	0,70
1 Ausfahrt I	227	1456	1	0,99313	1446	0,1570	0	-999	0,00	0,00	0	0,00		
Ausfahrt O	908	1397	1	1,00000	1397	0,6500	908	1397	0,65	0,65	0	0,00		
Zufahrt li	227	1640	3	0,88765	1456	0,1559	817	818	1,00	0,00	0	0,00		
Zufahrt re	0	1640	3	0,99998	1640	0,00000	91	1033	0,09	0,09	0	0,00		
2 Ausfahrt I	908	1640	1	0,79494	1304	0,6963	0	-999	0,00	0,00	0	0,00		
Ausfahrt O	227	1397	1	1,00000	1397	0,1625	227	1397	0,16	0,16	0	0,00		
Zufahrt li	908	1640	3	0,99999	1640	0,55337	136	450	0,30	0,30	0	0,00		
Zufahrt re	0	1640	3	0,92589	1518	0,00000	91	1033	0,09	0,09	0	0,00		
3 Ausfahrt I	227	1456	1	0,99313	1446	0,1570	0	-999	0,00	0,00	0	0,00		
Ausfahrt O	908	1397	1	1,00000	1397	0,6500	908	1397	0,65	0,65	0	0,00		
Zufahrt re	0	1640	3	0,88765	1456	0,1559	817	818	1,00	0,00	0	0,00		
4 Ausfahrt I	908	1640	1	0,79494	1304	0,6963	0	-999	0,00	0,00	0	0,00		
Ausfahrt O	227	1397	1	1,00000	1397	0,1625	227	1397	0,16	0,16	0	0,00		
Zufahrt li	908	1640	3	0,99999	1640	0,55337	136	450	0,30	0,30	0	0,00		
Zufahrt re	0	1640	3	0,92589	1518	0,00000	91	1033	0,09	0,09	0	0,00		
1 Ausfahrt I	227	1456	1	0,99313	1446	0,1570	0	-999	0,00	0,00	0	0,00		
Ausfahrt O	908	1397	1	1,00000	1397	0,6500	908	1397	0,65	0,65	0	0,00		

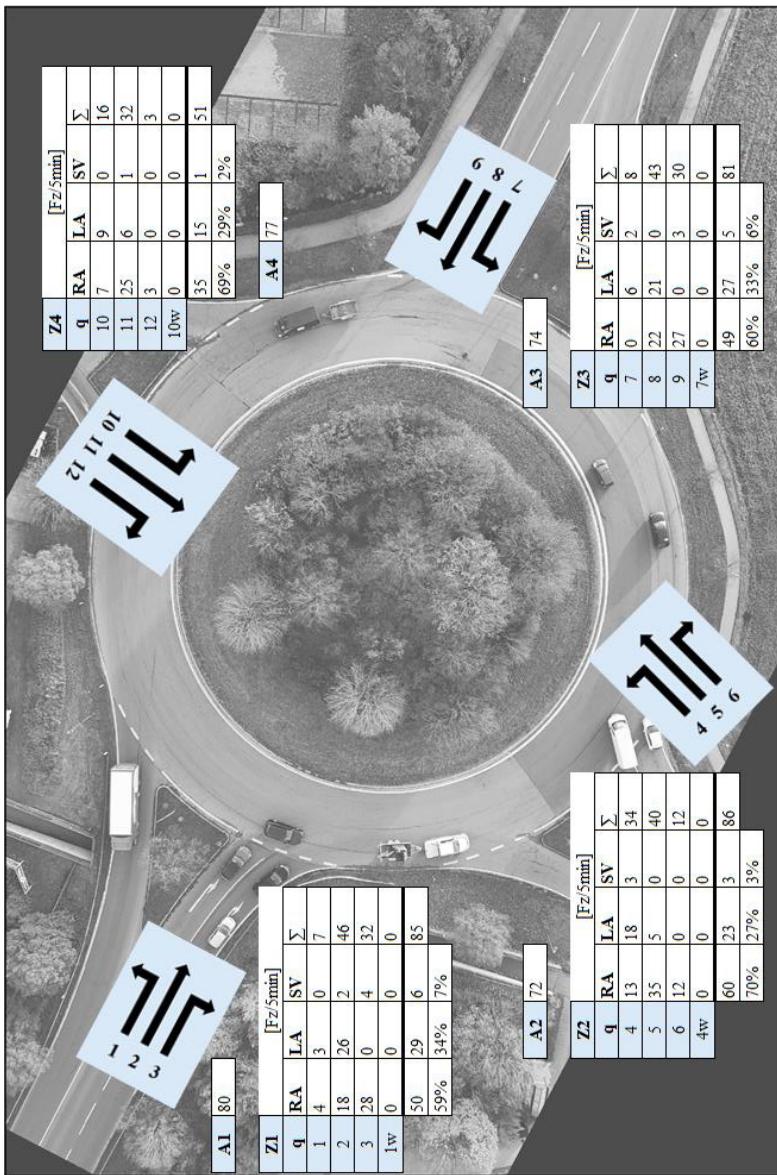
A-Abbildung 8: Tabellarische Berechnung der Kapazität für Fahrweise 2 nach WU & BRILON [2018] – Aufteilung HR/NR 80/20

---

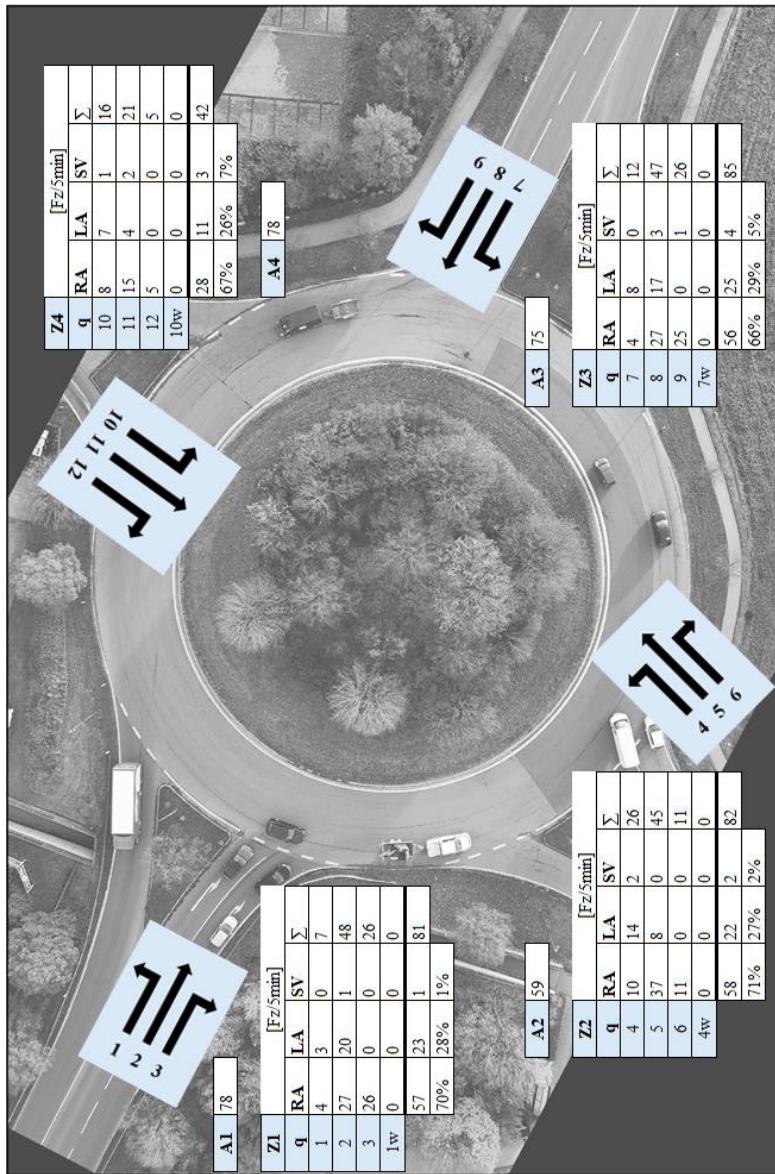
## **Anhang 2 Ergebnisse der Knotenpunktzählung**



A-Abbildung 9: Ergebnisse der Knotenpunktzählung für das Intervall 6



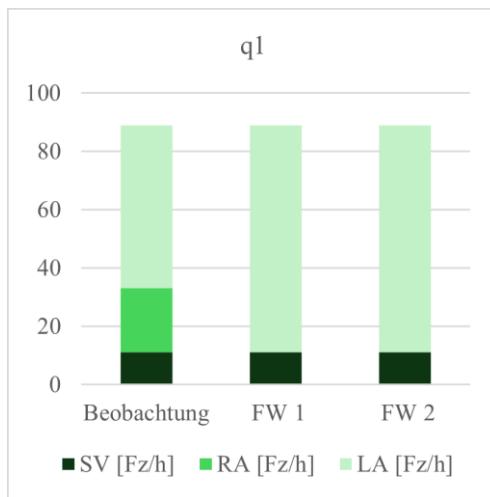
A-Abbildung 10: Ergebnisse der Knotenpunktzählung für das Intervall 7



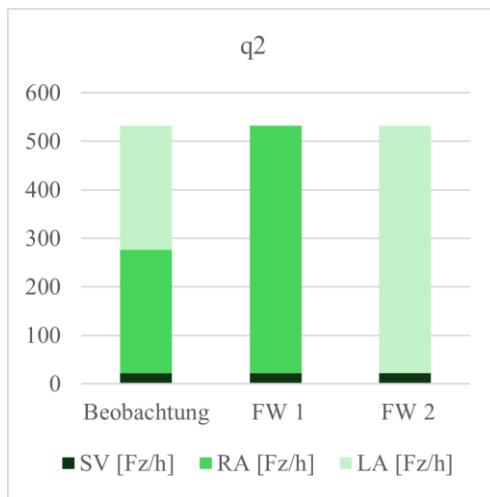
A-Abbildung 11: Ergebnisse der Knotenpunktzählung für das Intervall 8

---

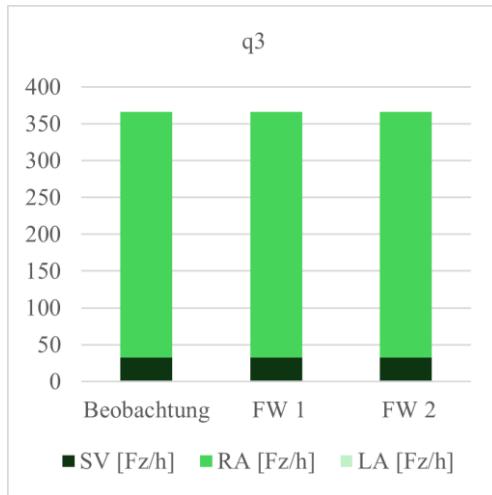
### **Anhang 3 Vergleich der Knotenpunktzählung mit den Fahrweisen 1 und 2**



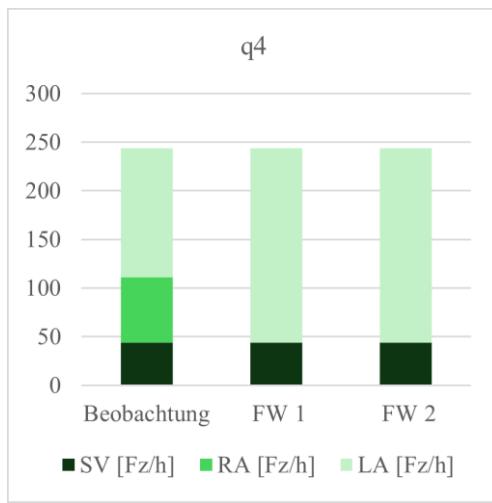
A-Abbildung 12: Verteilung des Verkehrsstroms q1 im Intervall 6



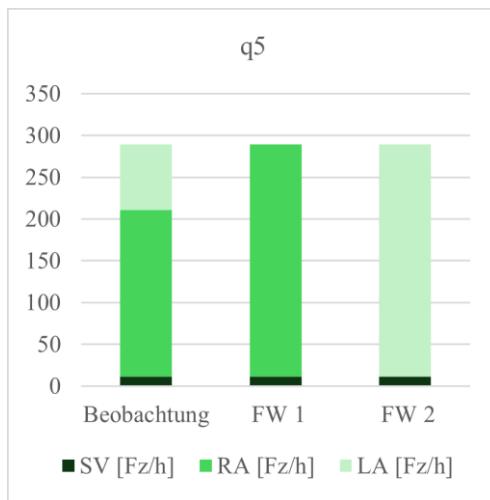
A-Abbildung 13: Verteilung des Verkehrsstroms q2 im Intervall 6



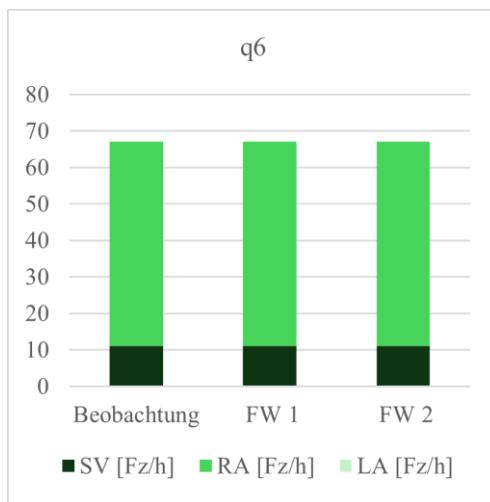
A-Abbildung 14: Verteilung des Verkehrsstroms q3 im Intervall 6



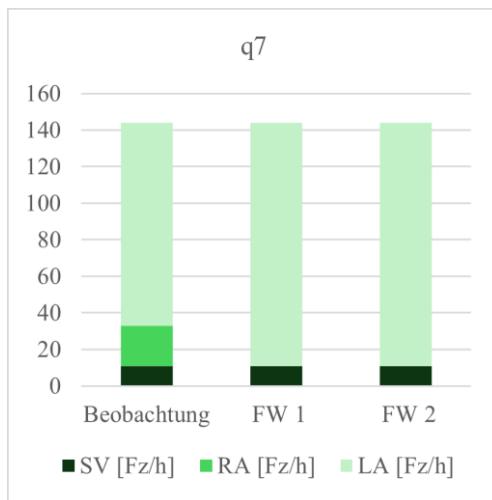
A-Abbildung 15: Verteilung des Verkehrsstroms q4 im Intervall 6



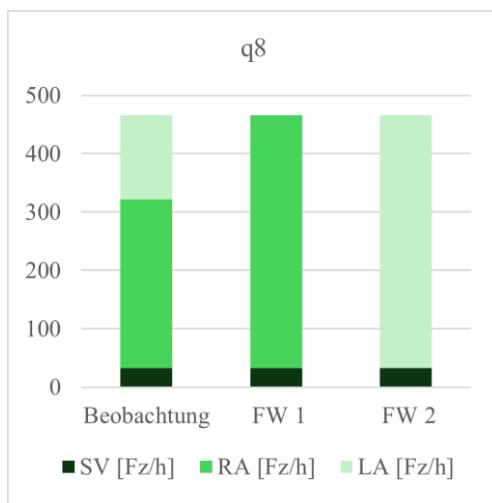
A-Abbildung 16: Verteilung des Verkehrsstroms q5 im Intervall 6



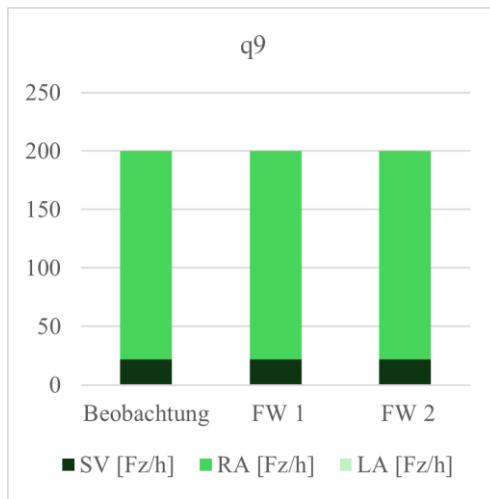
A-Abbildung 17: Verteilung des Verkehrsstroms q6 im Intervall 6



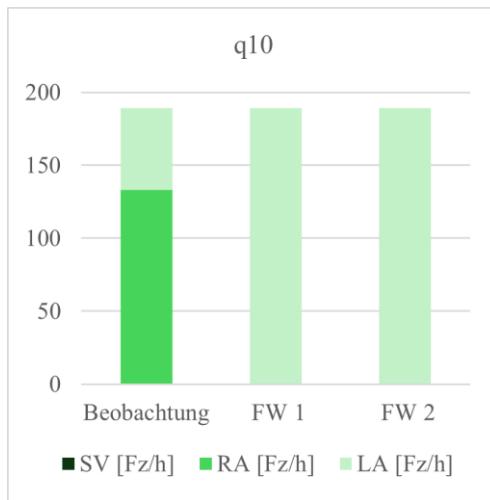
A-Abbildung 18: Verteilung des Verkehrsstroms q7 im Intervall 6



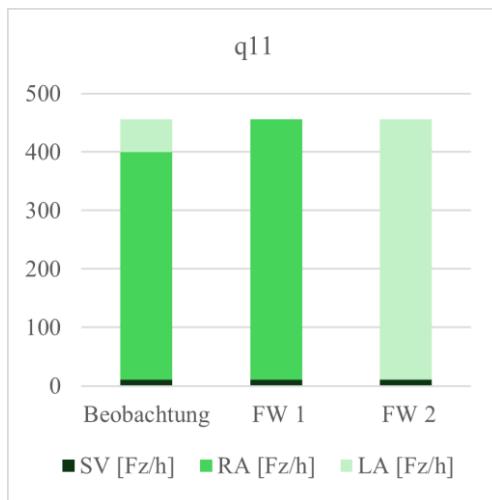
A-Abbildung 19: Verteilung des Verkehrsstroms q8 im Intervall 6



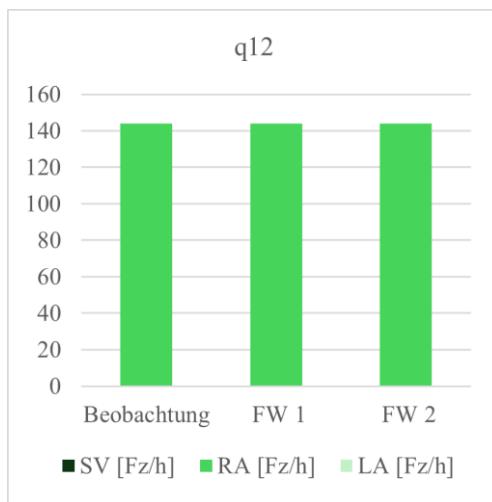
A-Abbildung 20: Verteilung des Verkehrsstroms q9 im Intervall 6



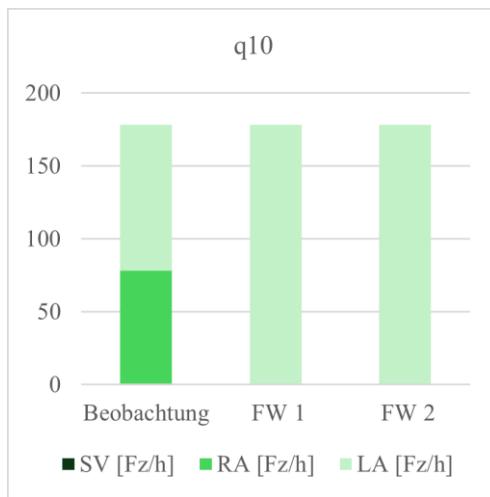
A-Abbildung 21: Verteilung des Verkehrsstroms q10 im Intervall 6



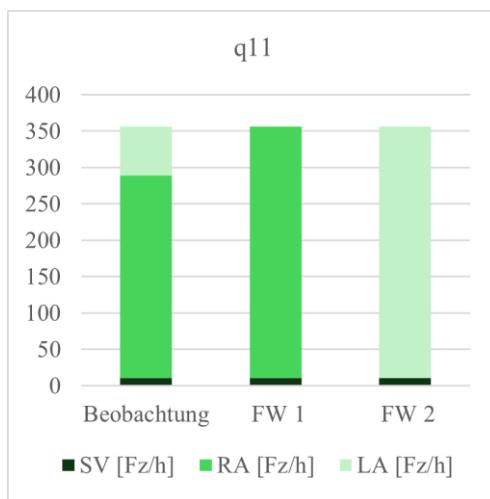
A-Abbildung 22: Verteilung des Verkehrsstroms q11 im Intervall 6



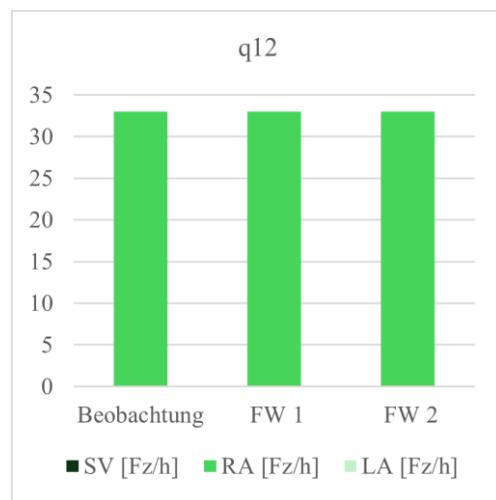
A-Abbildung 23: Verteilung des Verkehrsstroms q12 im Intervall 6



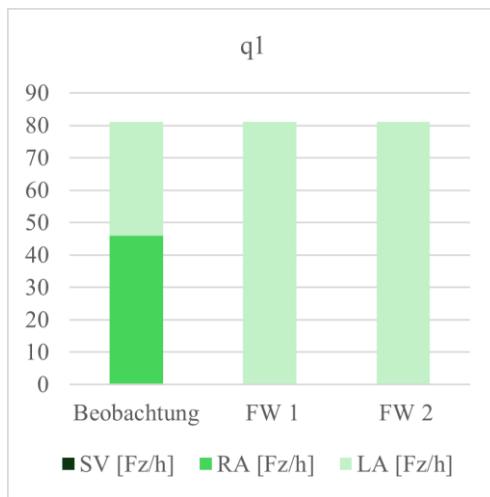
A-Abbildung 24: Verteilung des Verkehrsstroms q10 im Intervall 7



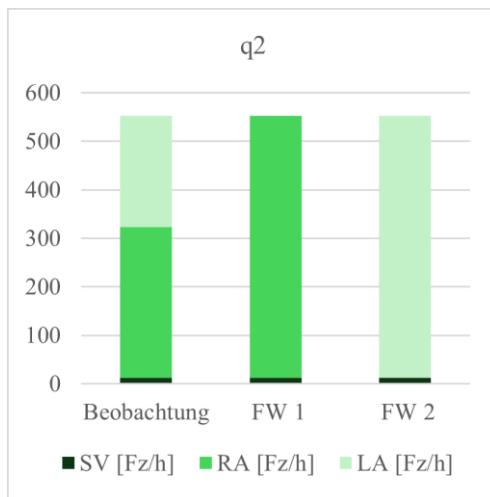
A-Abbildung 25: Verteilung des Verkehrsstroms q11 im Intervall 7



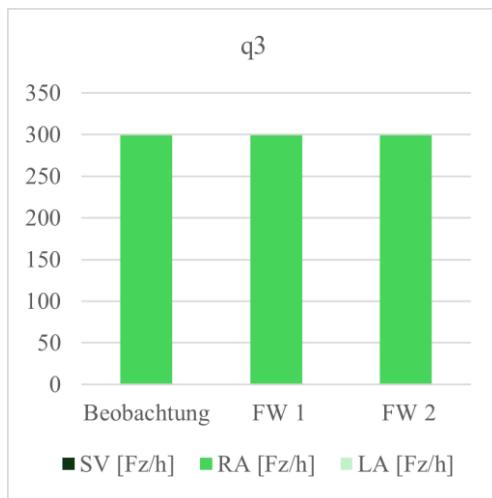
A-Abbildung 26: Verteilung des Verkehrsstroms q12 im Intervall 7



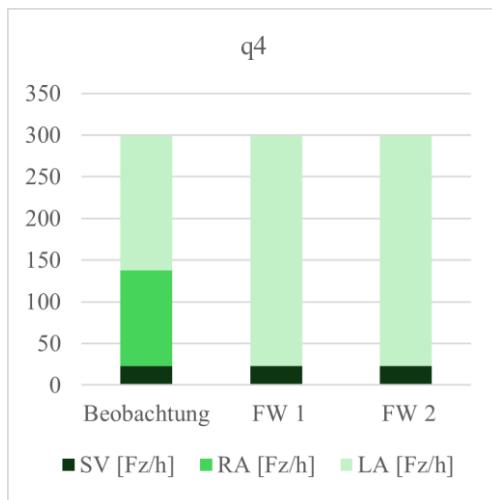
A-Abbildung 27: Verteilung des Verkehrsstroms q1 im Intervall 8



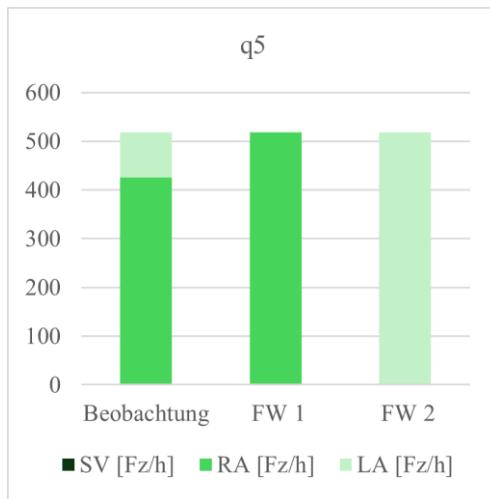
A-Abbildung 28: Verteilung des Verkehrsstroms q2 im Intervall 8



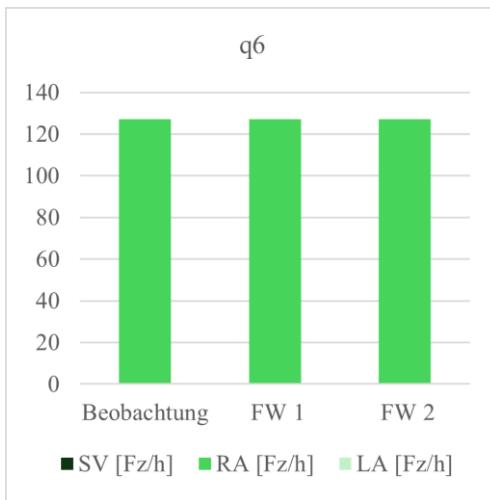
A-Abbildung 29: Verteilung des Verkehrsstroms q3 im Intervall 8



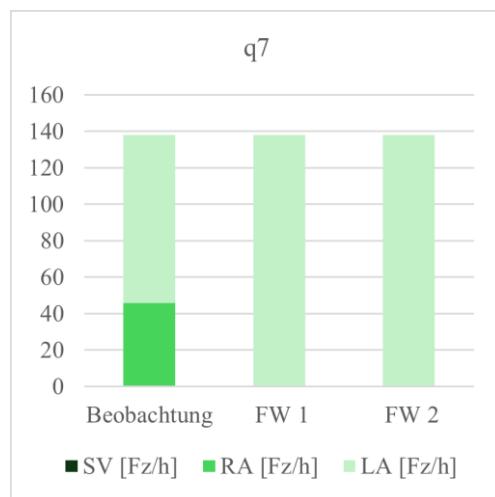
A-Abbildung 30: Verteilung des Verkehrsstroms q4 im Intervall 8



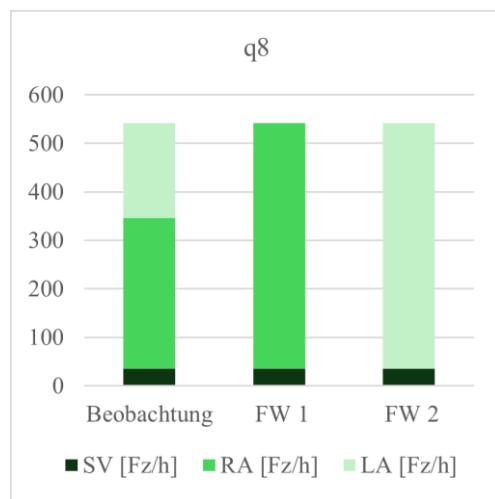
A-Abbildung 31: Verteilung des Verkehrsstroms q5 im Intervall 8



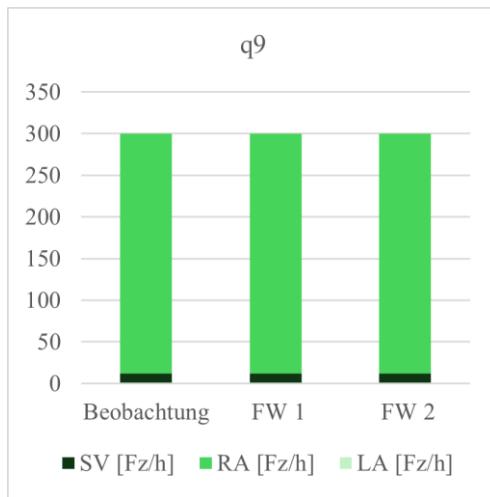
A-Abbildung 32: Verteilung des Verkehrsstroms q6 im Intervall 8



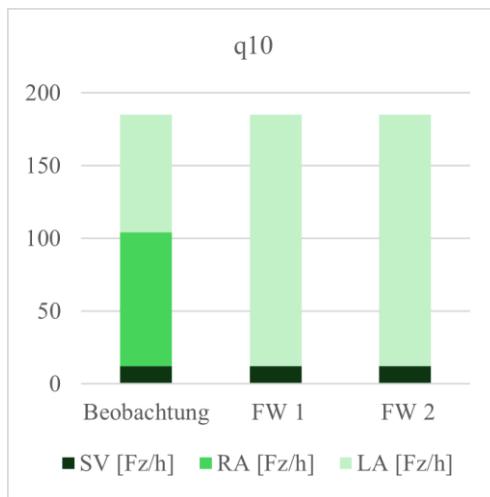
A-Abbildung 33: Verteilung des Verkehrsstroms q7 im Intervall 8



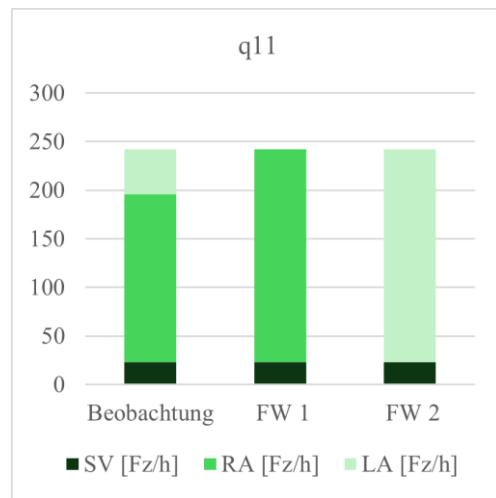
A-Abbildung 34: Verteilung des Verkehrsstroms q8 im Intervall 8



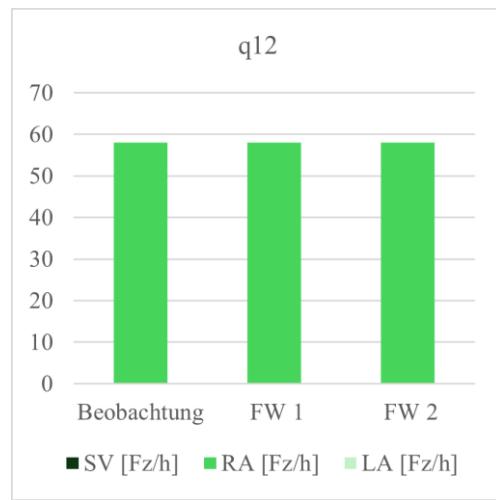
A-Abbildung 35: Verteilung des Verkehrsstroms q9 im Intervall 8



A-Abbildung 36: Verteilung des Verkehrsstroms q10 im Intervall 8



A-Abbildung 37: Verteilung des Verkehrsstroms q1 im Intervall 8



A-Abbildung 38: Verteilung des Verkehrsstroms q12 im Intervall 8

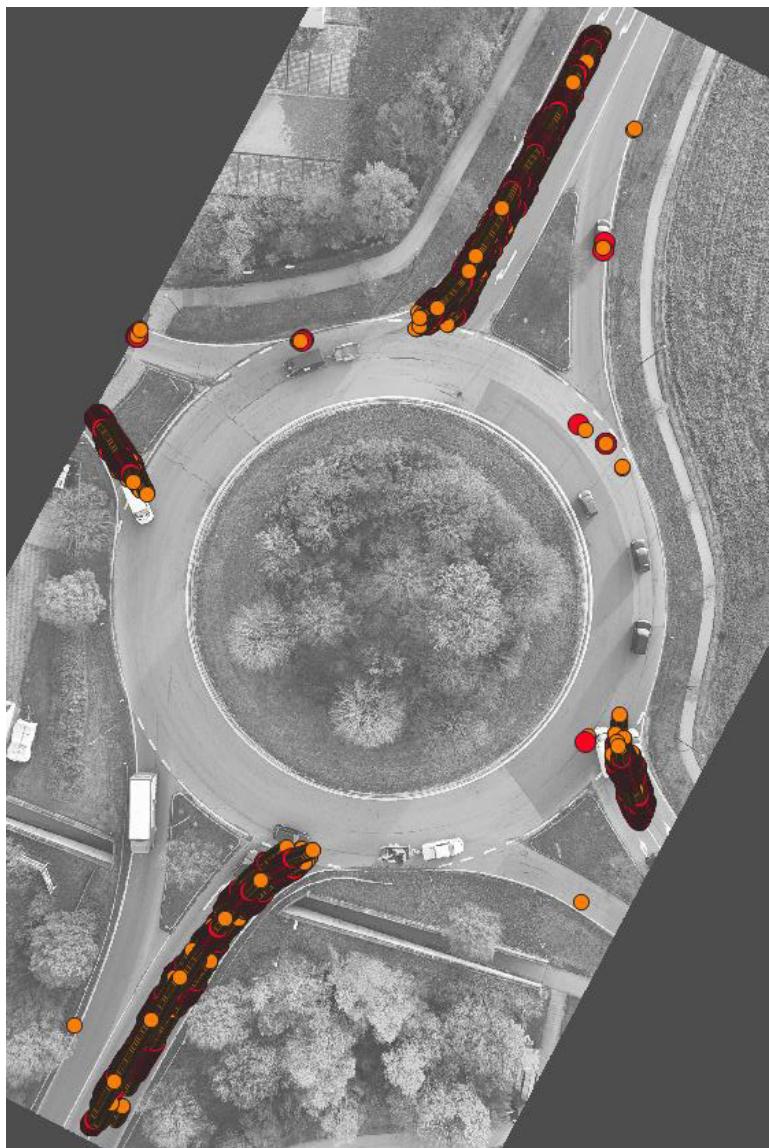
## **Anhang 4 Bereiche mit verringerten Geschwindigkeiten (Verkehrsuntersuchung)**



A-Abbildung 39: Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall 6 (RA)



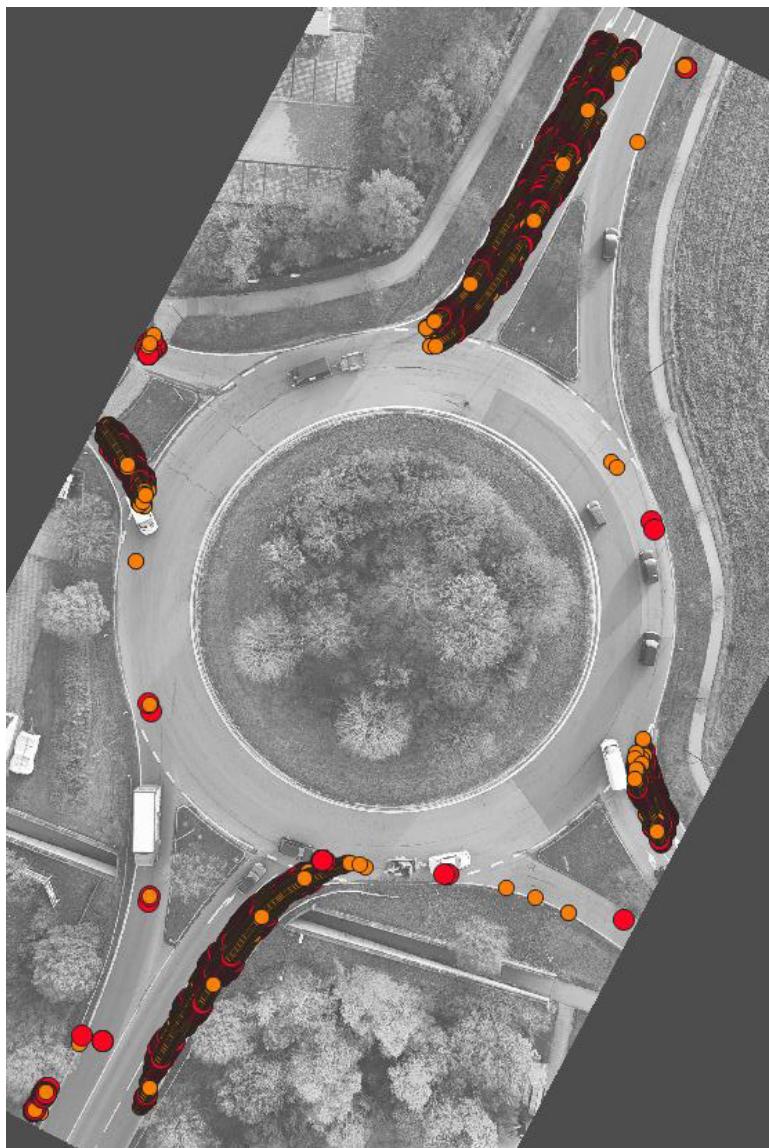
A-Abbildung 40: Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall 6 (LA)



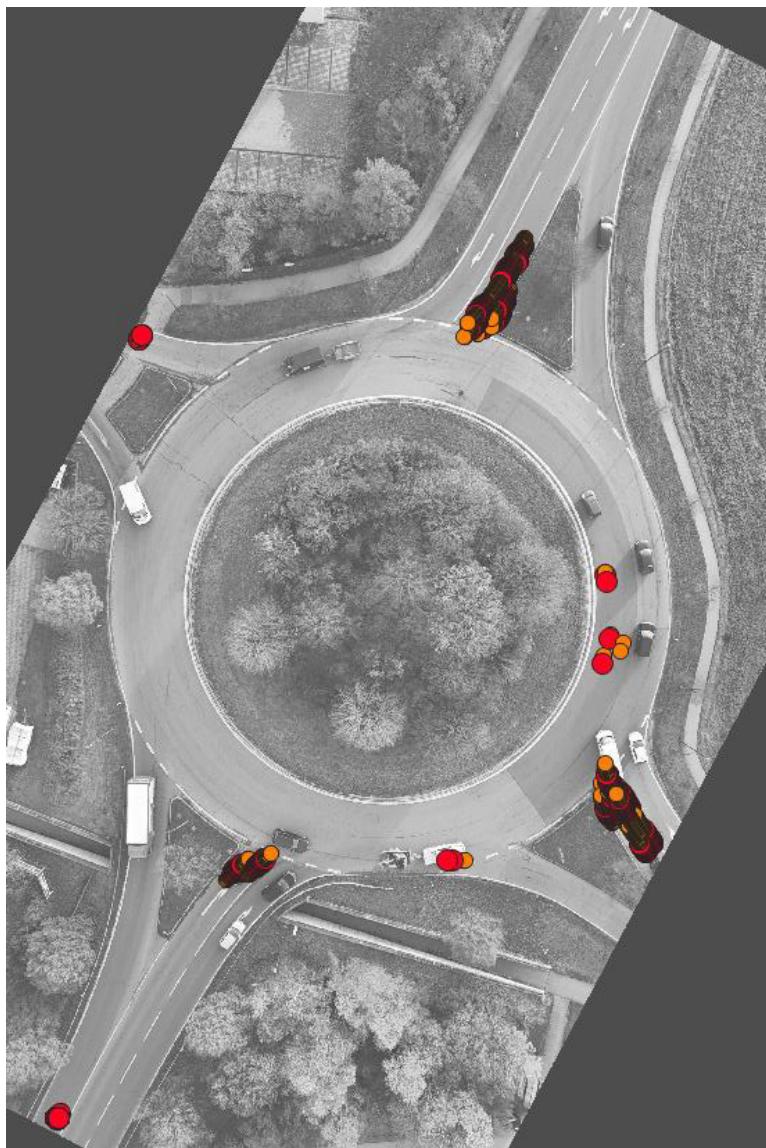
A-Abbildung 41: Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall 7 (RA)



A-Abbildung 42: Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall 7 (LA)



A-Abbildung 43: Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall 8 (RA)



A-Abbildung 44: Verringerte Geschwindigkeiten im Intervall 8 (LA)

---

## **Anhang 5 Übergabe der Fahrzeugzuflüsse und Fahrzeugrouten an „PTV Vissim“**

Fahrweise 0 (erhobene Verkehrsbelastung)			Übergabe an 'PTV Vissim' (Prozent der gemessenen Belastung)		
VOLUME(1)			VOLUME(1)		
			Lastfall:	100%	
q1,RA + q2,RA + q3,RA			Zu10	555	
q1,LA + q2,LA			Zu11	322	
q1,SV + q2,SV + q3,SV			Zu12	67	
q4,RA + q5,RA + q6,RA			Zu20	666	
q4,LA + q5,LA			Zu21	255	
q4,SV + q5,SV + q6,SV			Zu22	33	
q7,RA + q8,RA + q9,RA			Zu30	544	
q7,LA + q8,LA			Zu31	300	
q7,SV + q8,SV + q9,SV			Zu32	56	
q10,RA + q11,RA + q12,RA			Zu40	389	
q10,LA + q11,LA			Zu41	167	
q10,SV + q11,SV + q12,SV			Zu42	11	
LA (1)      GA (2)      RA (3)			LA (1)      GA (2)      RA (3)		
q1,RA	q2,RA	q3,RA	10 Z1R	48	216
q1,LA	q2,LA	x	11 Z1L	36	312
q1,SV	q2,SV	q3,SV	12 Z1LKW	0	24
q4,RA	q5,RA	q6,RA	20 Z2R	156	420
q4,LA	q5,LA	x	21 Z2L	216	60
q4,SV	q5,SV	q6,SV	22 Z2LKW	36	0
q7,RA	q8,RA	q9,RA	30 Z3R	0	264
q7,LA	q8,LA	x	31 Z3L	72	252
q7,SV	q8,SV	q9,SV	32 Z3LKW	24	0
q10,RA	q11,RA	q12,RA	40 Z4R	84	300
q10,LA	q11,LA	x	41 Z4L	108	72
q10,SV	q11,SV	q12,SV	42 Z4LKW	0	12

A-Abbildung 45: Zusammensetzung der Fahrzeugzuflüsse und Fahrzeugrouten [Fz/h] zur Übergabe an 'PTV Vissim' – Fahrweise 0

Fahrweise 1 (Deutschland)			Übergabe Vissim (Prozent der gemessenen Belastung)		
VOLUME(1)			VOLUME(1)		
	Lastfall:	100%	Zu10	799	
q2,LA + q2,RA + q3,RA			Zu11	78	
q1,LA + q1,RA			Zu12	67	
q1,SV + q2,SV + q3,SV			Zu20	577	
q5,LA + q5,RA + q6,RA			Zu21	344	
q4,LA + q4,RA			Zu22	33	
q4,SV + q5,SV + q6,SV			Zu30	777	
q8,LA + q8,RA + q9,RA			Zu31	67	
q7,LA + q7,RA			Zu32	56	
q7,SV + q8,SV + q9,SV			Zu40	377	
q11,LA + q11,RA + q12,RA			Zu41	178	
q10,LA + q10,RA			Zu42	11	
q10,SV + q11,SV + q12,SV					
LA (1)      GA (2)      RA (3)			LA (1)      GA (2)      RA (3)		
x	q2,RA+q2,LA	q3,RA	10 Z1R	0	528    336
q1,LA+q1,RA	x	x	11 Z1L	84	0    0
q1,SV	q2,SV	q3,SV	12 Z1Lkw	0	24    48
x	q5,RA+q5,LA	q6,RA	20 Z2R	0	480    144
q4,LA + q4,RA	x	x	21 Z2L	372	0    0
q4,SV	q5,SV	q6,SV	22 Z2Lkw	36	0    0
x	q8,RA+q8,LA	q9,RA	30 Z3R	0	516    324
q7,LA+q7,RA	x	x	31 Z3L	72	0    0
q7,SV	q8,SV	q9,SV	32 Z3Lkw	24	0    36
x	q11,RA+q11,LA	q12,RA	40 Z4R	0	372    36
q10,LA+q10,RA	x	x	41 Z4L	192	0    0
q10,SV	q11,SV	q12,SV	42 Z4Lkw	0	12    0

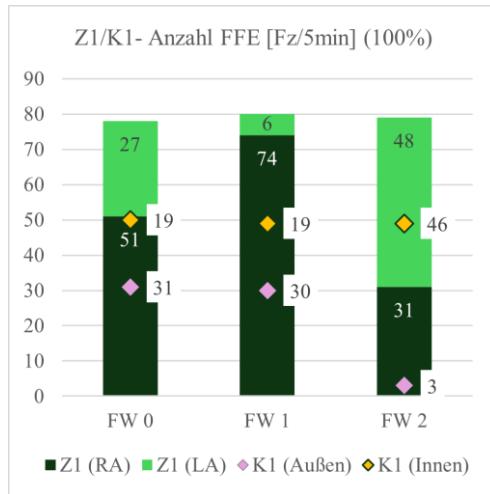
A-Abbildung 46: Zusammensetzung der Fahrzeugzuflüsse und Fahrzeugrouten [Fz/h] zur Übergabe an „PTV Vissim“ – Fahrweise 1

Fahrweise 2 (Portugal)			Übergabe Vissim (Prozent der gemessenen Belastung)			
VOLUME(1)				VOLUME(1)		
q3,RA			Lastfall: 100%	Zu10	311	
q1,LA + q1,RA + q2,LA + q2,RA				Zu11	566	
q1,SV + q2,SV + q3,SV				Zu12	67	
q6,RA				Zu20	133	
q4,LA + q4,RA + q5,LA + q5,RA				Zu21	788	
q4,SV + q5,SV + q6,SV				Zu22	33	
q9,RA				Zu30	300	
q7,LA + q7,RA + q8,LA + q8,RA				Zu31	544	
q7,SV + q8,SV + q9,SV				Zu32	56	
q12,RA				Zu40	33	
q10,LA + q10,RA + q11,LA + q11,RA				Zu41	522	
q10,SV + q11,SV + q12,SV				Zu42	11	
LA(1)	GA(2)	RA(3)		LA(1)	GA(2)	RA(3)
x	x	q3,RA		10 Z1R	0	0 336
q1,LA+q1,RA	q2,RA+q2,LA	x		11 Z1L	84	528 0
q1,SV	q2,SV	q3,SV		12 Z1Lkw	0	24 48
x	x	q6,RA		20 Z2R	0	0 144
q4,LA + q4,RA	q5,RA+q5,LA	x		21 Z2L	372	480 0
q4,SV	q5,SV	q6,SV		22 Z2Lkw	36	0 0
x	x	q9,RA		30 Z3R	0	0 324
q7,LA+q7,RA	q8,RA+q8,LA	x		31 Z3L	72	516 0
q7,SV	q8,SV	q9,SV		32 Z3Lkw	24	0 36
x	x	q12,RA		40 Z4R	0	0 36
q10,LA+q10,RA	q11,RA+q11,LA	x		41 Z4L	192	372 0
q10,SV	q11,SV	q12,SV		42 Z4Lkw	0	12 0

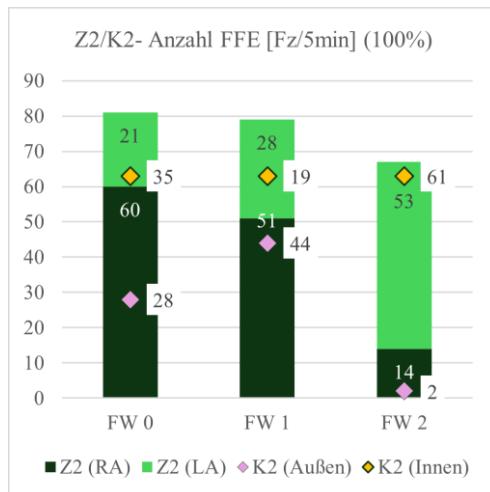
A-Abbildung 47: Zusammensetzung der Fahrzeugzuflüsse und Fahrzeugrouten [Fz/h] zur Übergabe an „PTV Vissim“ – Fahrweise 2

---

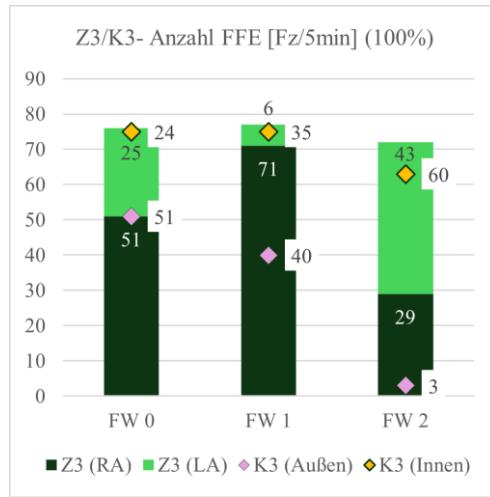
## **Anhang 6 Ergebnisse des Simulationsexperiments zu Kapitel 8.1 und 8.2**



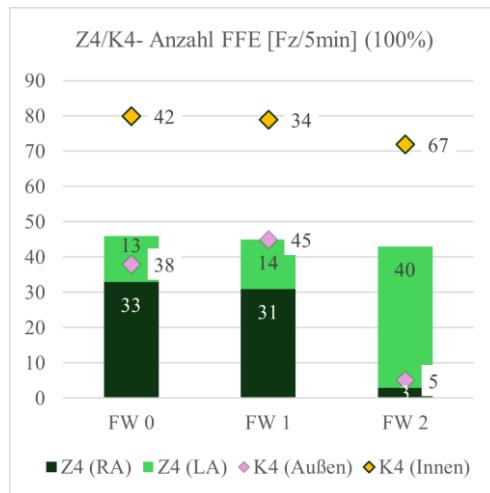
A-Abbildung 48: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 1 und dem Kreisquerschnitt 1 nach Fahrweise, bei 100 % Gesamtverkehrsbelastung



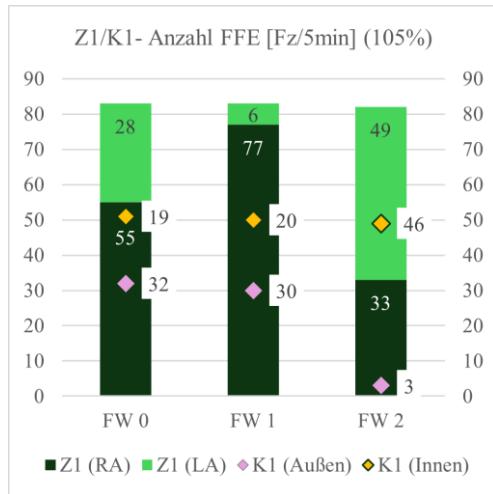
A-Abbildung 49. Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 2 und dem Kreisquerschnitt 2 nach Fahrweise, bei 100 % Gesamtverkehrsbelastung



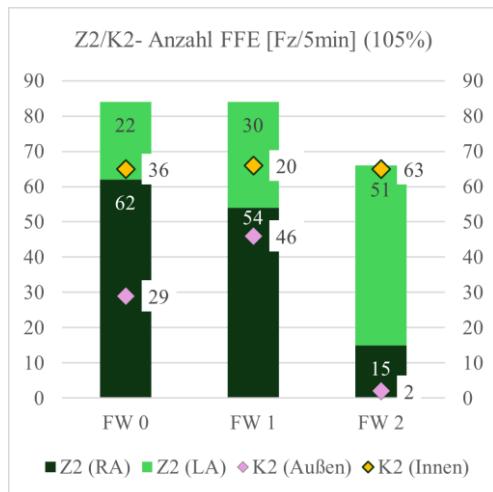
A-Abbildung 50: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 3 und dem Kreisquerschnitt 3 nach Fahrweise, bei 100 % Gesamtverkehrsbelastung



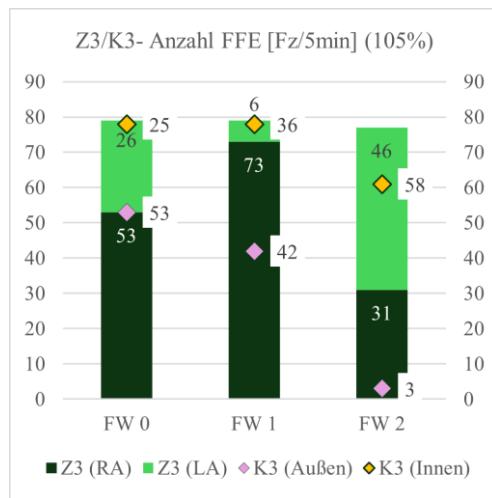
A-Abbildung 51: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 4 und dem Kreisquerschnitt 4 nach Fahrweise, bei 100 % Gesamtverkehrsbelastung



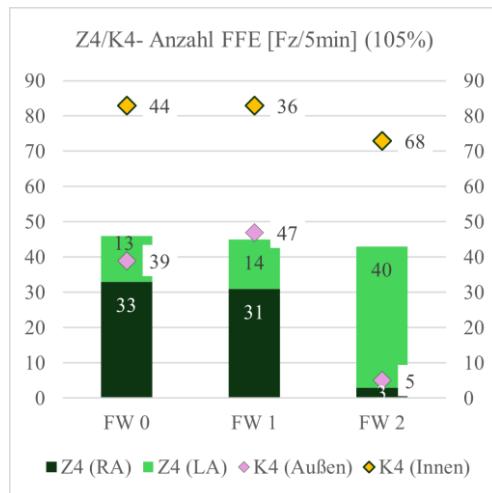
A-Abbildung 52: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 1 und dem Kreisquerschnitt 1 nach Fahrweise, bei 105 % Gesamtverkehrsbelastung



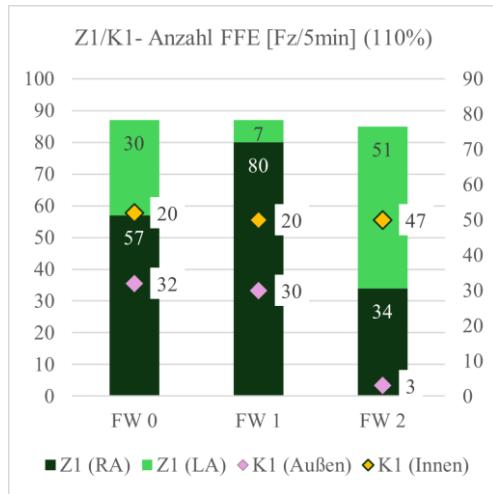
A-Abbildung 53: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 2 und dem Kreisquerschnitt 2 nach Fahrweise, bei 105 % Gesamtverkehrsbelastung



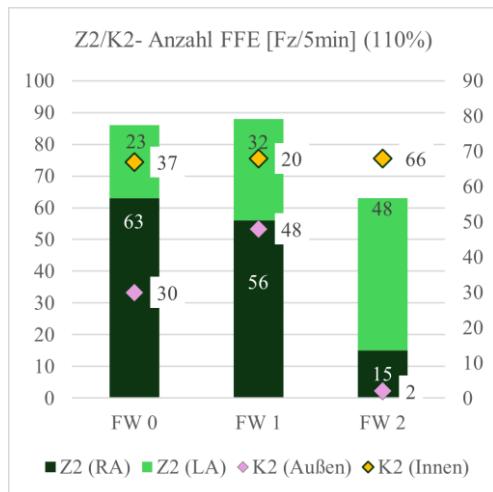
A-Abbildung 54: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 3 und dem Kreisquerschnitt 3 nach Fahrweise, bei 105 % Gesamtverkehrsbelastung



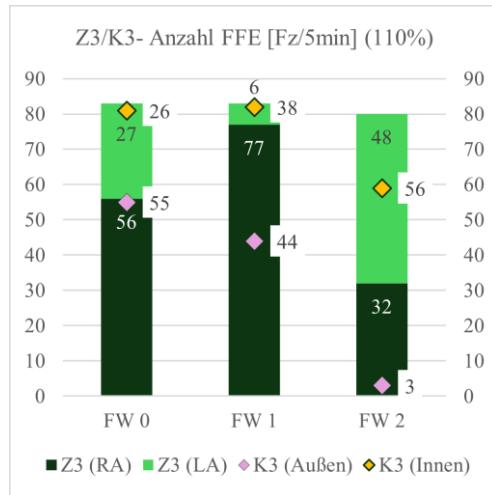
A-Abbildung 55: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 4 und dem Kreisquerschnitt 4 nach Fahrweise, bei 105 % Gesamtverkehrsbelastung



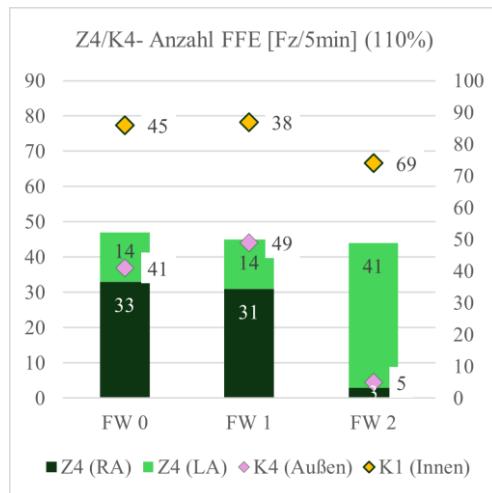
A-Abbildung 56: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 1 und dem Kreisquerschnitt 1 nach Fahrweise, bei 110 % Gesamtverkehrsbelastung



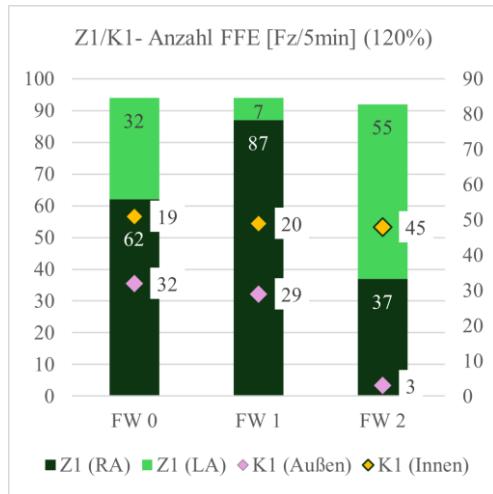
A-Abbildung 57: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 2 und dem Kreisquerschnitt 2 nach Fahrweise, bei 110 % Gesamtverkehrsbelastung



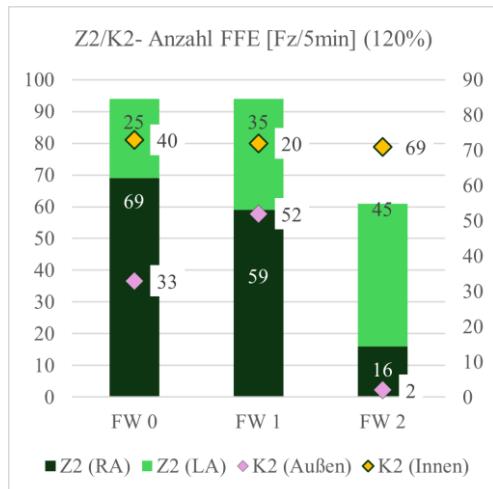
A-Abbildung 58: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 3 und dem Kreisquerschnitt 3 nach Fahrweise, bei 110 % Gesamtverkehrsbelastung



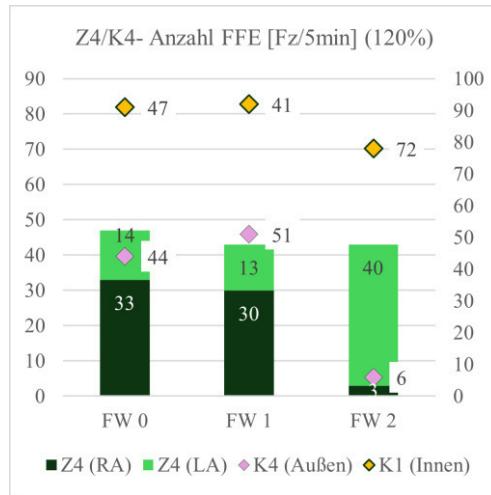
A-Abbildung 59: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 4 und dem Kreisquerschnitt 4 nach Fahrweise, bei 110 % Gesamtverkehrsbelastung



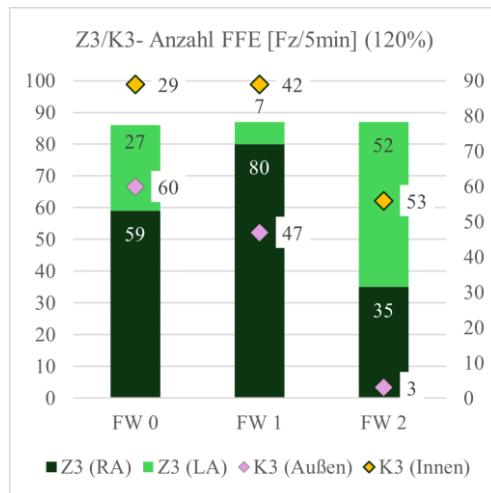
A-Abbildung 60: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 1 und dem Kreisquerschnitt 1 nach Fahrweise, bei 120 % Gesamtverkehrsbelastung



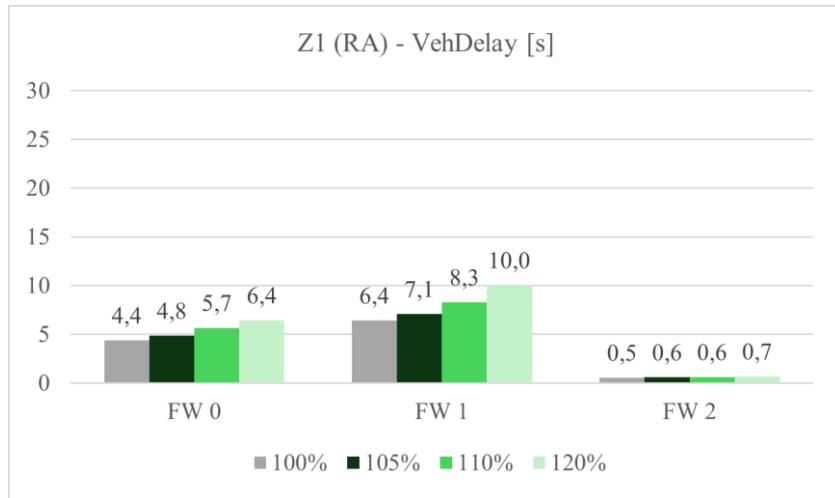
A-Abbildung 61: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 2 und dem Kreisquerschnitt 2 nach Fahrweise, bei 120 % Gesamtverkehrsbelastung



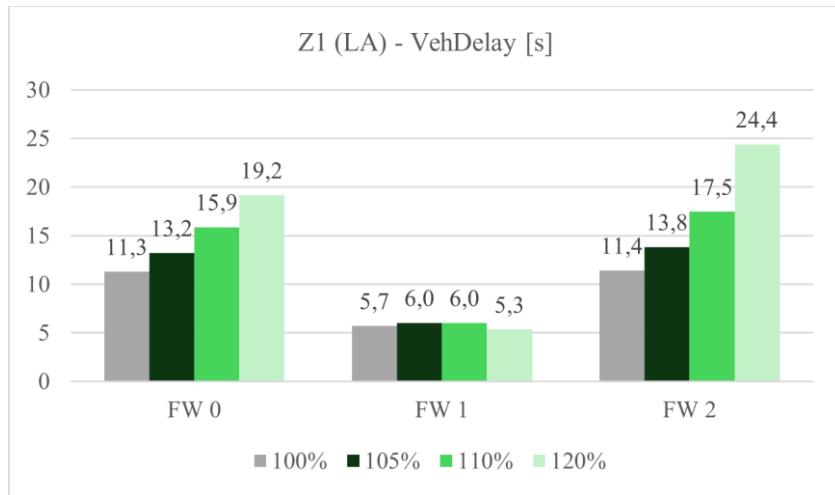
A-Abbildung 62: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 3 und dem Kreisquerschnitt 3 nach Fahrweise, bei 120 % Gesamtverkehrsbelastung



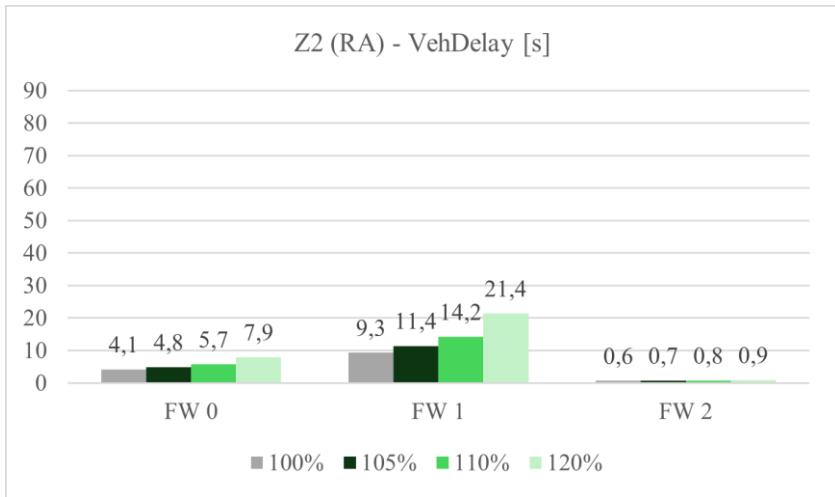
A-Abbildung 63: Verteilung der FFE auf die jeweiligen beiden Fahrstreifen der Zufahrt 4 und dem Kreisquerschnitt 4 nach Fahrweise, bei 120 % Gesamtverkehrsbelastung



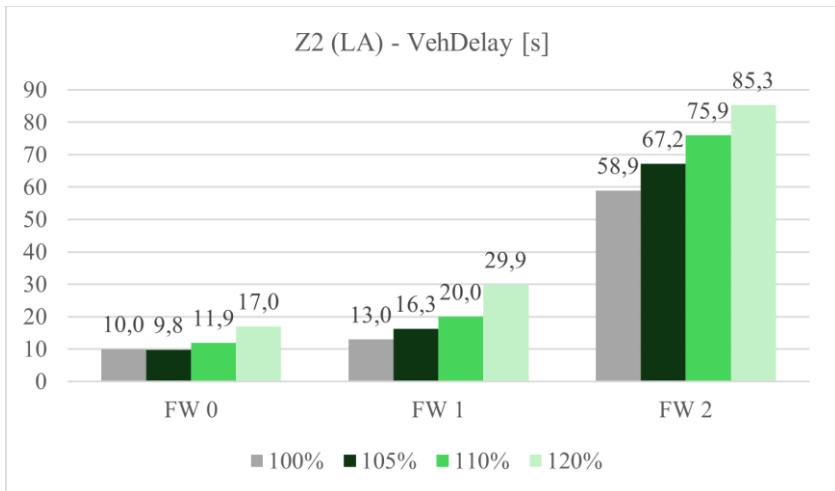
A-Abbildung 64: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z1 bei steigender Verkehrsbelastung



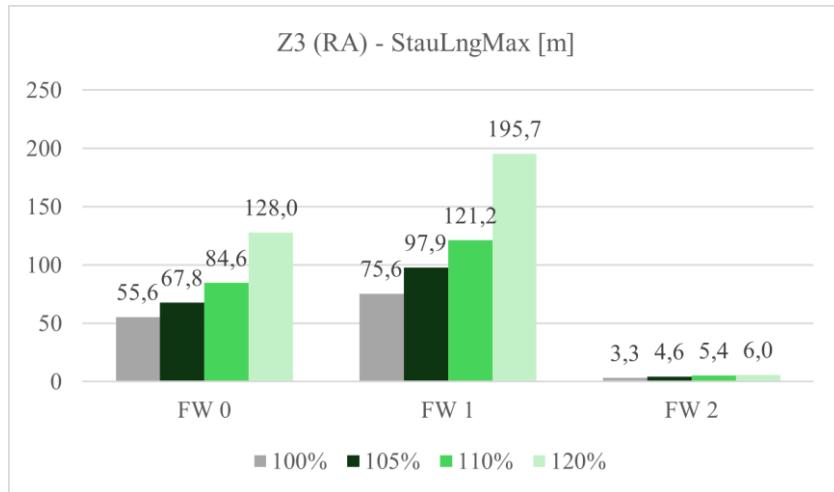
A-Abbildung 65: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z1 bei steigender Verkehrsbelastung



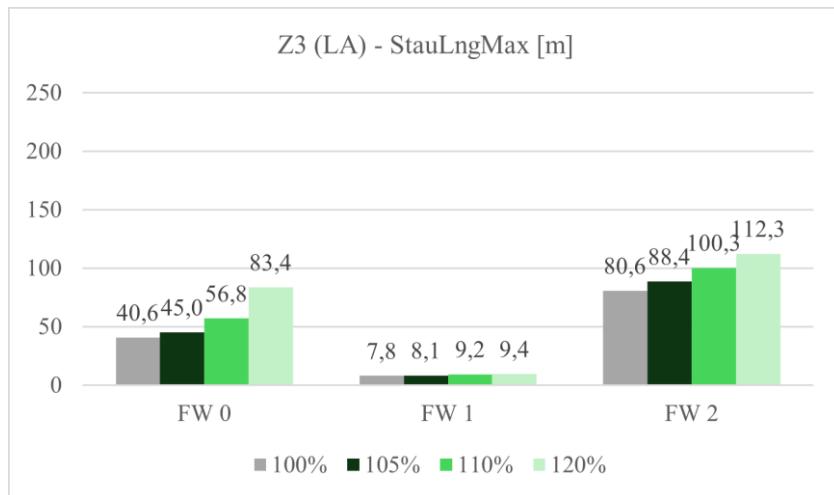
A-Abbildung 66: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z2 bei steigender Verkehrsbelastung



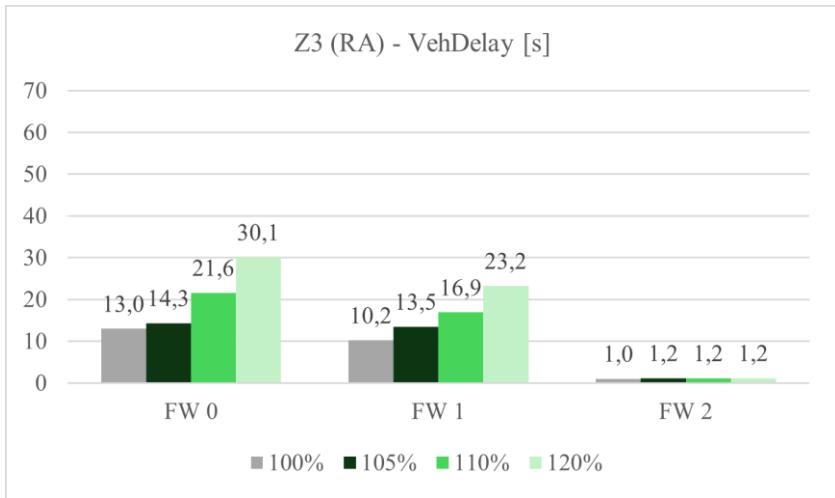
A-Abbildung 67: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z2 bei steigender Verkehrsbelastung



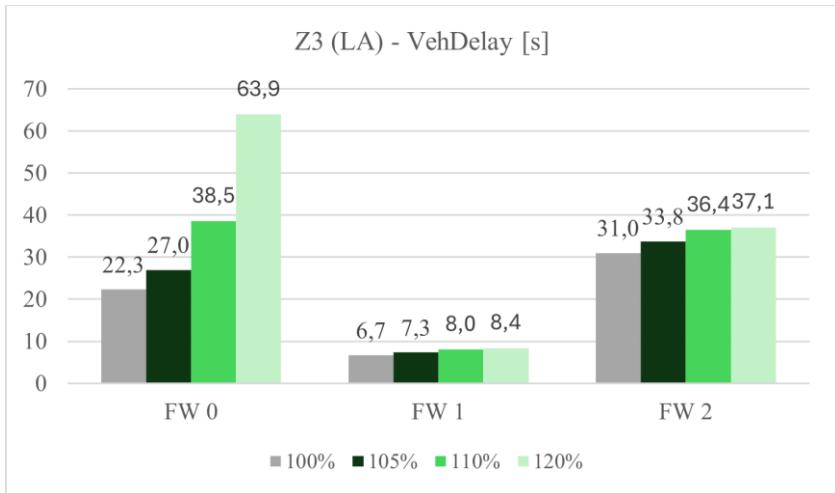
A-Abbildung 68: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z3 bei steigender Verkehrsbelastung



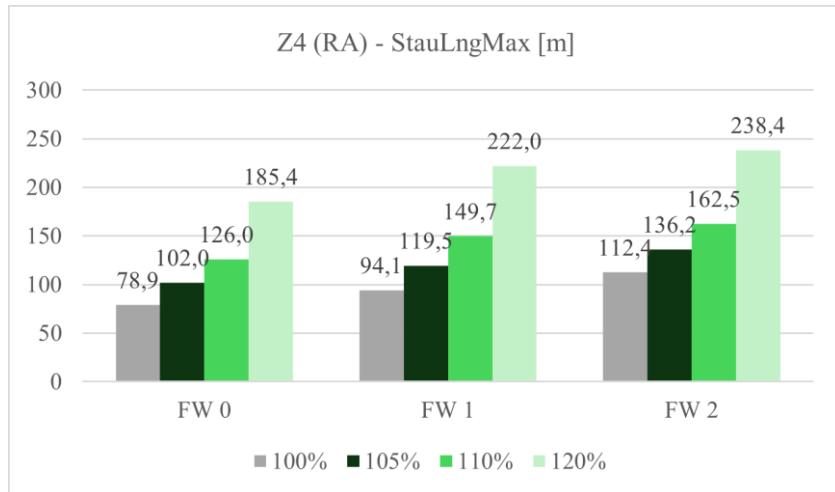
A-Abbildung 69: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z3 bei steigender Verkehrsbelastung



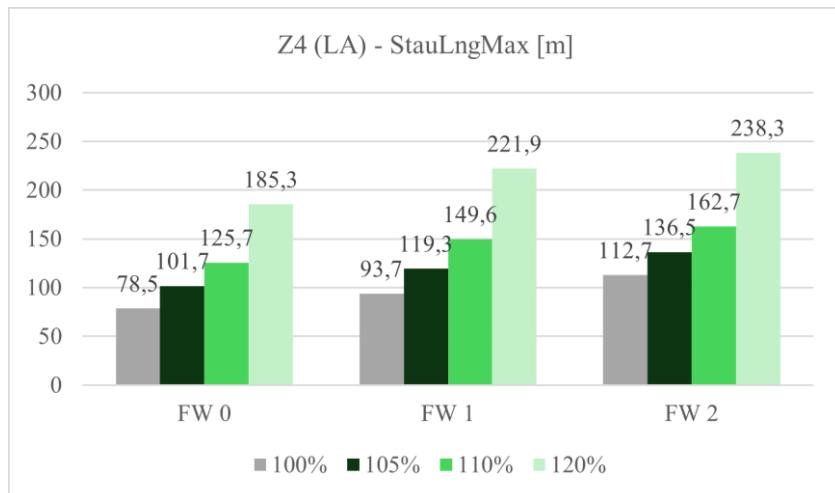
A-Abbildung 70: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z3 bei steigender Verkehrsbelastung



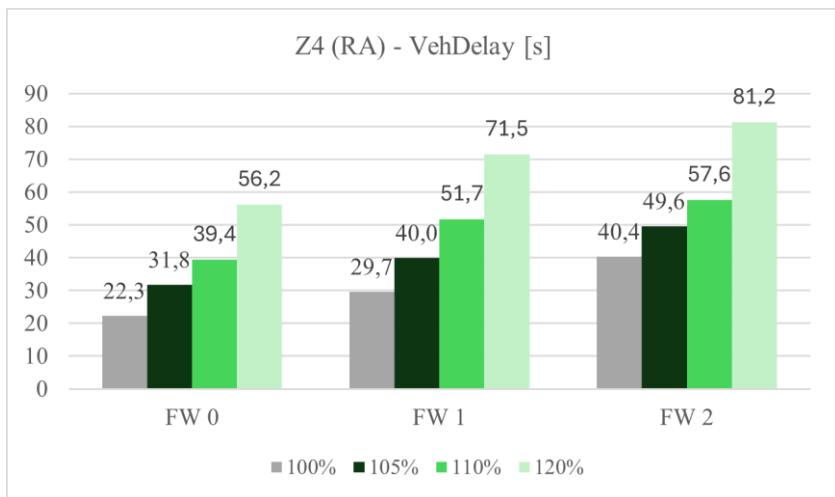
A-Abbildung 71: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z3 bei steigender Verkehrsbelastung



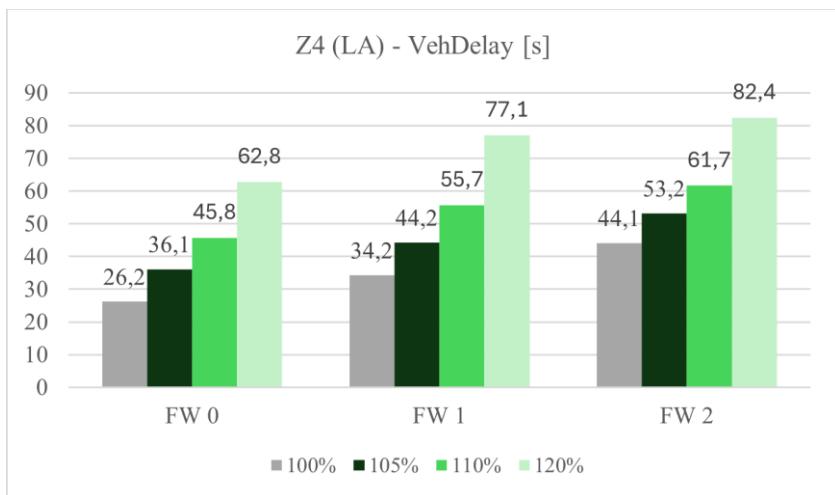
A-Abbildung 72: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z4 bei steigender Verkehrsbelastung



A-Abbildung 73: Übersicht über die ermittelten Staulängen (Maximal) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z4 bei steigender Verkehrsbelastung



A-Abbildung 74: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den rechten Fahrstreifen der Zufahrt Z4 bei steigender Verkehrsbelastung



A-Abbildung 75: Übersicht über die Fahrzeugverlustzeit (Mittelwert) für den linken Fahrstreifen der Zufahrt Z4 bei steigender Verkehrsbelastung