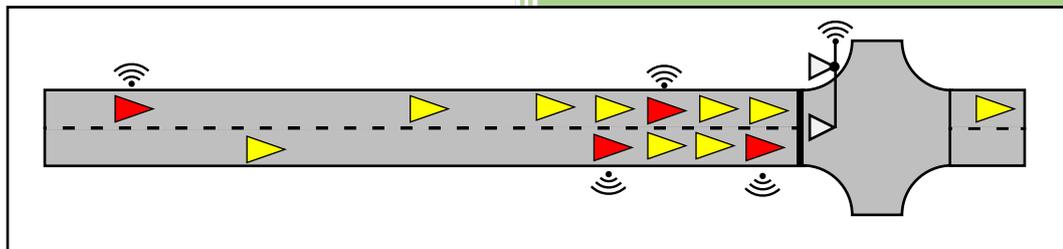


Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung des aktuellen Verkehrsaufkommens in einem innerstädtischen Straßennetz mittels vernetzter Fahrzeuge und vorhandener Detektoren von Knotenpunkten

—
Untersuchung in einer mikroskopischen Verkehrsflussimulation



Betreuer: Daniel Wesemeyer M.Sc.
Erstprüfer: Prof. Dr. Katharina Seifert
Zweitprüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich
Abgabedatum: 28. Januar 2020

Masterarbeit:
Verkehringenieurwesen
am
Institut für Verkehrssystemtechnik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
und
Institut für Verkehr und Stadtbauwesen
Technische Universität Braunschweig
Name: Maik Halbach
Matrikelnummer: 4373821

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Aufgabenstellung.....	1
2 Untersuchungsmethodik.....	2
2.1 Ergänzungen der Vorgehensweise.....	4
3 Literaturrecherche.....	5
3.1 Datenerhebung im Straßenverkehr.....	5
3.2 Definition eines vernetzten Fahrzeuges.....	5
3.3 ETSI ITS.....	6
3.3.1 Nachrichtentypen ETSI ITS.....	7
3.4 Bestehende Verfahren und Untersuchungen.....	8
3.4.1 Staulängenbestimmung mittels V2I-Daten unter Verwendung eines vernetzten Fahrzeuges als „mobilen“ und „virtuellen“ Detektor.....	8
3.4.2 Moving Observer.....	9
3.4.3 Virtuelle Induktionsschleife basierend auf kooperativer Fahrzeugkommunikation.....	10
3.4.4 Vernetztes Fahrzeug als Sensor sowie Aktor.....	10
4 Simulationssoftware.....	11
4.1 Mikroskopische Verkehrsflusssimulationen.....	11
4.2 SUMO - Simulation of Urban Mobility.....	11
5 Annahmen.....	12
5.1 Kommunikation.....	12
5.2 Lichtsignalanlagen.....	12
5.3 Fahrzeuge.....	12
6 Verfahren.....	13
6.1 Auswertedimensionen.....	13
6.2 Verfahren – mit vernetzten Fahrzeugen.....	14
6.2.1 Bestimmung der maximalen Staulänge - mit LSA.....	14

6.2.2	Bestimmung der maximalen Staulänge - ohne LSA	16
6.2.3	Abflussbestimmung - mit LSA	17
6.2.4	Verfahren Ankunft 1, Ankunft 2 und Ankunft 3.....	18
6.2.5	Reisezeitprognose	21
6.2.6	Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar - mit LSA	21
6.2.7	Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar - ohne LSA	23
6.3	Verfahren für Induktionsschleifen	24
7	Generisches Netz.....	25
7.1	Simulationsszenarien - generisches Netz.....	25
7.1.1	Anzahl an Simulationen und Startzufallszahlen.....	25
7.1.2	Verkehrsbelastung - generisches Netz.....	25
7.1.3	Simulationsszenario - Strecke mit LSA.....	27
7.1.4	Simulationsszenario - Strecke ohne LSA	27
7.2	Auswertung - Strecke mit LSA	28
7.2.1	Staulänge und Reisezeitprognose.....	28
7.2.2	Auswertung der maximalen Staulängenbestimmung - mit LSA	31
7.2.3	Auswertung des Verfahrens Abfluss - mit LSA.....	35
7.2.4	Vorgehensweise bei der Auswertung für die Ankunftsverfahren	36
7.2.5	Auswertung des Verfahrens Ankunft 1.....	37
7.2.6	Auswertung des Verfahrens Ankunft 2	39
7.2.7	Auswertung des Verfahrens Ankunft 3.....	40
7.2.8	Ankünfte 1 , 2 und 3 im Vergleich.....	42
7.2.9	Anzahl an Fahrzeugen – Strecke mit LSA	44
7.3	Auswertung - Strecke ohne LSA	47
7.3.1	Auswertung der maximalen Staulängenbestimmung - ohne LSA	47
7.3.2	Auswertung des Verfahrens Ankunft 3 - ohne LSA.....	49
7.3.3	Auswertung des Verfahrens Anzahl an Fahrzeugen - ohne LSA.....	50
8	Szenario - realer Streckenzug in Braunschweig.....	54
8.1	Untersuchungsgebiet – Braunschweiger Knotenpunkte	54
8.2	Annahmen in der Simulation.....	55
8.3	Erhobene Fahrstreifen.....	56
8.4	Ergänzungen aufgrund eines effizienten Verkehrsablaufes	57
8.5	Besonderheit Fahrstreifenwechsel	58
8.6	Auswertung der Braunschweiger Knotenpunkte.....	59

8.6.1	Auswertung der maximalen Staulänge	59
8.6.2	Auswertung der Ankunftsverfahren (BS)	62
8.6.3	Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar	76
9	Zusammenfassung und Ausblick	83
9.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	83
9.2	Ausblick	86
10	Literaturverzeichnis.....	87
11	Anhang	90

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchungsmethodik	3
Abbildung 2: Lage von Induktionsschleifen vor einer LSA	5
Abbildung 3: „Virtueller“ Detektor [Priemer et al.] (S.5).....	8
Abbildung 4: Moving Observer [Naumann et al.] (S.20).....	9
Abbildung 5: Virtuelle Induktionsschleife	10
Abbildung 6: Definierte verkehrliche Größen - Auswertedimensionen	13
Abbildung 7: Reisezeit.....	14
Abbildung 8: Legende für die Abbildungen der Verfahren.....	14
Abbildung 9: Max. Staulänge	15
Abbildung 10: „Stauwelle“	15
Abbildung 11: Vermeidung der Detektion einer Stauwelle.....	15
Abbildung 12: Abfluss	17
Abbildung 13: Ankunft 1	18
Abbildung 14: Ankunft 2	19
Abbildung 15: Ankunft 3	20
Abbildung 16: Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar - mit LSA.....	21
Abbildung 17: Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar - ohne LSA:.....	23
Abbildung 18: Verkehrsbelastung Q1	25
Abbildung 19: Tatsächliche Verkehrsbelastung QT1 (mit LSA).....	26
Abbildung 20: Tatsächliche Verkehrsbelastung QT1.2 (ohne LSA).....	26
Abbildung 21: Simulationsszenario - Strecke mit LSA	27
Abbildung 22: Simulationsszenario - Strecke ohne LSA (vorfahrtsgeregelt).....	27
Abbildung 23: Reisezeiterhebung	29
Abbildung 24: Abweichung der Reisezeitprognose	29
Abbildung 25: Prozentuale Aufteilung - Abweichung der Reisezeitprognose.....	30
Abbildung 26: Abweichung Reisezeitprognose – Reisezeit (12, 100AvF).....	30
Abbildung 27: Max. Staulänge (100AvF bis 15AvF) – mit LSA	31
Abbildung 28: Abweichung der max. Staulänge - mit LSA.....	31
Abbildung 29: Boxplot – Abweichung der max. Staulänge - mit LSA.....	32
Abbildung 30: Boxplot – Abweichung der Anzahl an Fahrzeugen (Staulänge) - mit LSA	32
Abbildung 31: Anzahl an Fahrzeugen in der Staulänge	33
Abbildung 32: Staulänge von Simulationen unterschiedlicher AvF bei gleicher Startzufallszahl - gemeinsame Abbildung	33
Abbildung 33: Staulänge von Simulationen unterschiedlicher AvF bei gleicher Startzufallszahl	34
Abbildung 34: Abflussbestimmung.....	35
Abbildung 35: Anzahl an Fahrzeugen in der Staulänge	36
Abbildung 36: Werte Ankunft 1	37
Abbildung 37: Boxplot der Abweichungen von Ankunft 1	38
Abbildung 38: Werte Ankunft 2	39
Abbildung 39: Boxplot der Abweichungen von Ankunft 2	40
Abbildung 40: Werte Ankunft 3	40

Abbildung 41: Boxplot der Abweichungen von Ankunft 3	41
Abbildung 42: Boxplots der Abweichung – Ankünfte im Vergleich (100 AvF - 15 AvF)	43
Abbildung 43: Messwerte und die Abweichung an Fahrzeugen.....	44
Abbildung 44: Abweichung der Anzahl an erhobenen Fahrzeugen mittels Radar	44
Abbildung 45: Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar (verschiedene AvF bei gleicher Startzufallszahl) – mit LSA	46
Abbildung 46: Abweichung der max. Staulänge - ohne LSA	47
Abbildung 47: Boxplot - Abweichung der max. Staulänge - ohne LSA.....	48
Abbildung 48: Boxplot der Vergleichsstaulänge - ohne LSA	48
Abbildung 49: Werte der Ankunft 3 (ohne LSA).....	49
Abbildung 50: Boxplot der Abweichung Ankunft 3 (ohne LSA).....	50
Abbildung 51: Abweichung Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar - ohne LSA	50
Abbildung 52: Art der Abweichungen	51
Abbildung 53: Abweichung der Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar - ohne LSA.....	51
Abbildung 54: Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar (verschiedene AvF bei gleicher Startzufallszahl) – ohne LSA.....	53
Abbildung 55: Braunschweig - Lage der Knotenpunkte [Google]	54
Abbildung 56: Knotenpunkte: K1 und K2	54
Abbildung 57: Fahrbahnaufweitung.....	56
Abbildung 58: Erhobene Fahrstreifen und Verkehrsströme	56
Abbildung 59: Fahrstreifenwechsel.....	58
Abbildung 60: Max. Staulänge Leonhardplatz S-N R/G, G, L.....	60
Abbildung 61: Max. Staulänge Willy-Brandt-Platz R/G, G, L	60
Abbildung 62: Max. Staulänge Leonhardplatz N-S R/G, G, L.....	61
Abbildung 63: Max. Staulänge Altwiekering R, G, G	61
Abbildung 64: Willy-Brandt-Platz L A1.....	62
Abbildung 65: Leonhardplatz N-S L A1.....	62
Abbildung 66: Willy-Brandt-Platz L Ab. A1.....	63
Abbildung 67: Leonhardplatz N-S L Ab. A1.....	63
Abbildung 68: Willy-Brandt-Platz L Abfluss A1.....	63
Abbildung 69: Leonhardplatz N-S L Abfluss A1.....	63
Abbildung 70: Willy-Brandt-Platz L A2.....	64
Abbildung 71: Leonhardplatz N-S L A2.....	64
Abbildung 72: Willy-Brandt-Platz L Ab. A2.....	64
Abbildung 73: Leonhardplatz N-S L Ab. A2.....	64
Abbildung 74: Willy-Brandt-Platz L A3.....	65
Abbildung 75: Leonhardplatz N-S L A3.....	65
Abbildung 76: Willy-Brandt-Platz L Ab. A3.....	65
Abbildung 77: Leonhardplatz N-S L Ab. A3.....	65
Abbildung 78: Leonhardplatz S-N L A1.....	67
Abbildung 79: Leonhardplatz S-N L A2.....	67
Abbildung 80: Leonhardplatz S-N L Ab. A1.....	67
Abbildung 81: Leonhardplatz S-N L Ab. A2.....	67
Abbildung 82: Leonhardplatz S-N L A3.....	67
Abbildung 83: Leonhardplatz S-N L A3.....	67

Abbildung 84: Altewiekring R A1.....	68
Abbildung 85: Altewiekring R A2.....	68
Abbildung 86: Altewiekring R Ab. A1.....	68
Abbildung 87: Altewiekring R Ab. A2.....	68
Abbildung 88: Altewiekring R A3.....	69
Abbildung 89: Altewiekring R Ab. A3.....	69
Abbildung 90: Leonhardplatz N-S R/G, G A1.....	70
Abbildung 91: Leonhardplatz S-N R/G, G A1.....	70
Abbildung 92: Leonhardplatz N-S R/G, G Ab. A1	70
Abbildung 93: Leonhardplatz S-N R/G, G Ab. A1.....	70
Abbildung 94: Leonhardplatz N-S R/G, G A2.....	71
Abbildung 95: Leonhardplatz S-N R/G, G A2.....	71
Abbildung 96: Leonhardplatz N-S R/G, G Ab. A2.....	71
Abbildung 97: Leonhardplatz S-N R/G, G Ab. A2.....	71
Abbildung 98: Leonhardplatz N-S R/G, G A3.....	72
Abbildung 99: Leonhardplatz S-N R/G, G A3.....	72
Abbildung 100: Leonhardplatz N-S R/G, G Ab. 3.....	72
Abbildung 101: Leonhardplatz S-N R/G, G Ab. 3.....	72
Abbildung 102: Altewiekring G, G A1.....	73
Abbildung 103: Willy-Brandt-Platz R/G, G A1.....	73
Abbildung 104: Altewiekring G, G Ab. A1.....	73
Abbildung 105: Willy-Brandt-Platz R/G, G Ab. A1.....	73
Abbildung 106: Altewiekring G, G A2.....	74
Abbildung 107: Willy-Brandt-Platz R/G, G A2.....	74
Abbildung 108: Altewiekring G, G Ab. A2.....	74
Abbildung 109: Willy-Brandt-Platz R/G, G Ab. A2.....	74
Abbildung 110: Altewiekring G, G A3.....	75
Abbildung 111: Willy-Brandt-Platz R/G, G A3.....	75
Abbildung 112: Altewiekring G, G Ab. A3.....	75
Abbildung 113: Willy-Brandt-Platz R/G, G Ab. A3.....	75
Abbildung 114: Altewiekring R Anzahl an Fahrzeugen	76
Abbildung 115: Altewiekring G Anzahl an Fahrzeugen	77
Abbildung 116: Altewiekring G Anzahl an Fahrzeugen	77
Abbildung 117: Willy-Brandt-Platz R/G Anzahl an Fahrzeugen	77
Abbildung 118: Willy-Brandt-Platz G Anzahl an Fahrzeugen.....	78
Abbildung 119: Leonhardplatz S-N R/G Anzahl an Fahrzeugen.....	78
Abbildung 120: Leonhardplatz N-S G Anzahl an Fahrzeugen	78
Abbildung 121: Willy-Brandt-Platz L Anzahl an Fahrzeugen.....	79
Abbildung 122: Leonhardplatz S-N R/G Anzahl an Fahrzeugen.....	79
Abbildung 123: Leonhardplatz S-N G Anzahl an Fahrzeugen	79
Abbildung 124: Leonhardplatz S-N L Anzahl an Fahrzeugen	80
Abbildung 125: Leonhardplatz N-S L Anzahl an Fahrzeugen	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: AvF.....	26
Tabelle 2: Staulängen Update in [s].....	35
Tabelle 3: Ankünfte im Vergleich	42
Tabelle 3: Zusammenfassung der Auswertung der Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar.....	81

Abkürzungsverzeichnis

ACC	adaptive cruise control
ALDW	Advanced Lane Departure Warning-System
AvF	Ausstattungsrate an vernetzten Fahrzeugen
C2I	Car-to-Infrastructure
CAM	Cooperative Awareness Messages
DSRC	Dedicated Short Range Communications
ETSI	European Telecommunications and Standards Institute
FCD	Floating-Car-Data
FCO	Floating Car Observer
G	Geradeaus
GLOSA	Green Light Optimal Speed Advisory
GPS	Global Positioning System
ITS	Intelligente Transportsysteme
KX	Knotenpunkt X (X = Index)
L	Links
LDP	Lane Departure Prevention
LKS	Lane Keeping Support
LSA	Lichtsignalanlage
R/G	Rechts/Geradeaus
SPATM	Signal Phase And Timing Extended Message
SUMO	Simulation of Urban Mobility
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
vF	vernetztes Fahrzeug
WLAN	Wireless Local Area Network
X AVF	Ausstattungsrate von X (X = Prozent an vernetzten Fahrzeugen)

1 EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Die Mobilität im Straßenverkehr wird zukünftig maßgeblich von der Vernetzung sowie der Automatisierung der Verkehrsmittel beeinflusst werden. Vor allem durch die Vernetzung der Verkehrsteilnehmer untereinander (Vehicle-to-Vehicle, V2V) und mit der Infrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure, V2I) werden zukünftig neue in Echtzeit vorliegende Daten über das Verkehrsgeschehen geliefert. Diese Informationen können für die Beeinflussung des Verkehrs mittels Verkehrsmanagement genutzt werden, um den Verkehrsablauf zu beeinflussen und effizienter gestalten zu können. Senden Fahrzeuge kontinuierlich ihre Position und Geschwindigkeit, lassen sich diese Daten als Eingangsdaten für eine Verkehrsberechnung und spätere Verkehrssteuerung nutzen. Auch die Automatisierung der Verkehrsmittel wird in Zukunft eine immer wichtigere Rolle in der Mobilität spielen und diese verändern. Dies schafft neue Möglichkeiten und Angebote der Mobilität und induziert daraus zusätzlichen Verkehr sowie eine Erhöhung der Verkehrsnachfrage. Deshalb ist es umso wichtiger genauerer Daten über den aktuellen Verkehrsablauf zu erhalten. Mit Hilfe detaillierter Daten von vernetzten Fahrzeugen soll das Verkehrsmanagement verbessert werden, um damit die Mobilität effizienter gestalten zu können.

1.2 AUFGABENSTELLUNG

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Verfahren zu entwickeln, welches auf der Grundlage dynamischer Daten vernetzter Fahrzeuge die aktuelle Verkehrsbelastung in einem innerstädtischen Straßennetz und auf deren Strecken und Knotenpunkten unter Mischverkehrsbedingungen bestimmen kann. Mischverkehr bedeutet, dass keine Vollausrüstung mit vernetzten Fahrzeugen vorhanden ist. Ziel ist es, mit vernetzten Fahrzeugen, auch nicht vernetzte Fahrzeuge detektieren zu können. Ein vernetztes Fahrzeug wird als „mobiler Detektor“ genutzt, um die Verkehrsstärke und andere relevante verkehrstechnische Parameter abschätzen zu können. Um die erarbeiteten Verfahren nachzuweisen und untersuchen zu können, wird die mikroskopische Verkehrsflusssimulationssoftware SUMO des DLRs verwendet. Der Nachweis wird mithilfe eines generischen Netzes sowie zweier realer Braunschweiger Knotenpunkte in SUMO unter Einsatz verschiedener Ausstattungsraten von vernetzten Fahrzeugen durchgeführt.

2 UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Kapitel 2 zeigt die Arbeitsschritte auf, die zur Umsetzung der Aufgabenstellung erforderlich sind. Eine kurze Beschreibung der herkömmlichen Datenerhebung im Straßenverkehr sowie der geltenden Rahmenbedingungen für die Kommunikation von vernetzten Fahrzeugen folgt in Kapitel 3. Des Weiteren werden Ansätze einer Datenerhebung mittels vernetzter Fahrzeuge aufgezeigt. Kapitel 4 beinhaltet den Einsatz der mikroskopischen Verkehrsflusssimulationssoftware im Rahmen dieser Arbeit sowie die ausgewählte Software SUMO. Annahmen in Hinblick auf die Kommunikation und Gegebenheiten betreffend der Verkehrsteilnehmer dieser Untersuchung werden in Kapitel 5 aufgezeigt. Kapitel 6 dient zum Aufzeigen der erarbeiteten Verfahren und deren Einzelheiten sowie der Auswertung von verkehrlichen Größen. Simulationsszenarien des generischen Netzes werden in Kapitel 7 beschrieben. Kapitel 8 beinhaltet einige Funktionserweiterungen für ausgewählte Verfahren. Gefolgt von der Beschreibung und Auswertung der Simulationsszenarien der Braunschweiger Knotenpunkte. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Ausblick erfolgt in Kapitel 9. Die generelle Vorgehensweise ist in Abbildung 1 aufgezeigt.

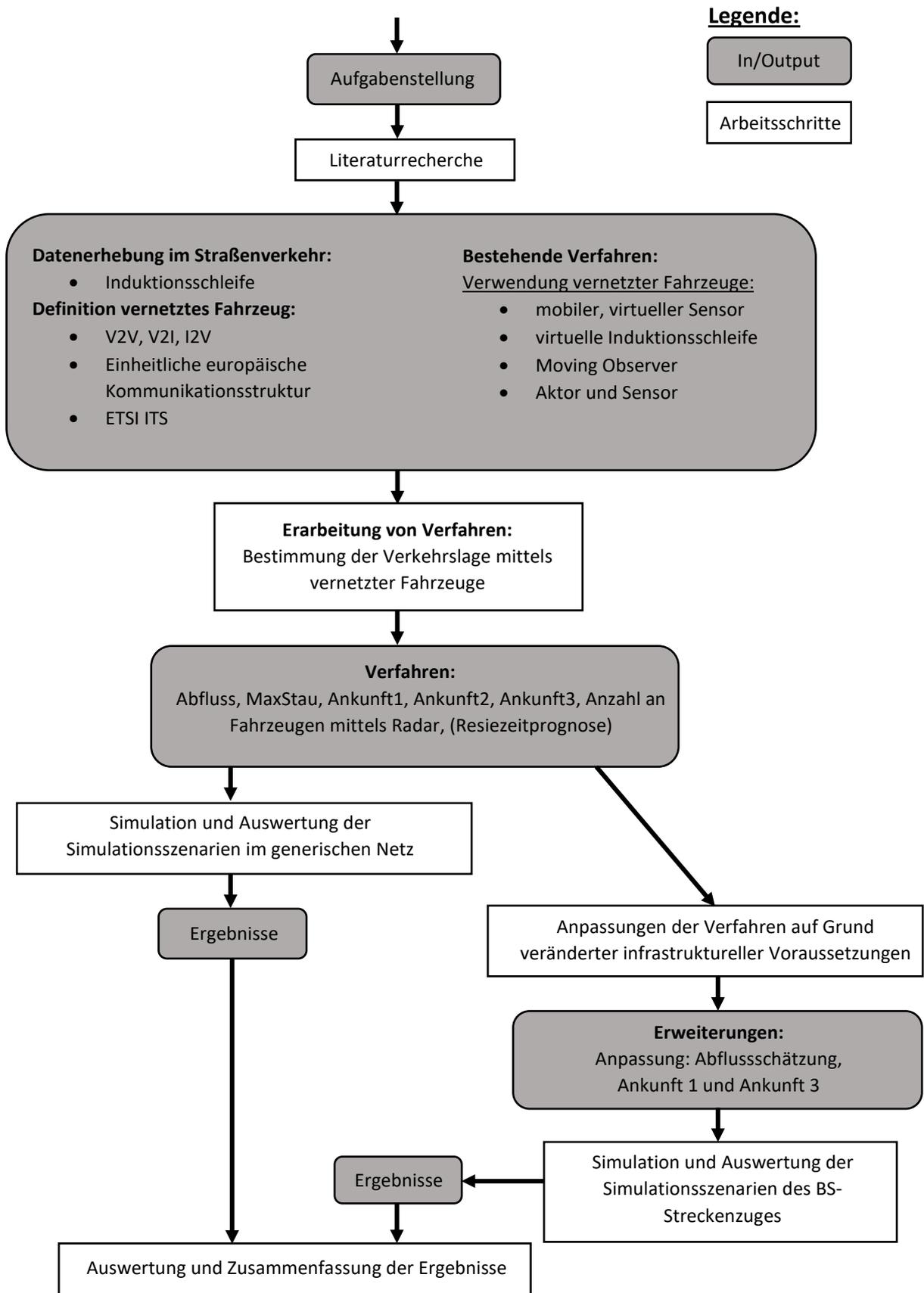


Abbildung 1: Untersuchungsmethodik

2.1 ERGÄNZUNGEN DER VORGEHENSWEISE

Vollausstattung mit vernetzten Fahrzeugen

Für diese Arbeit wird die Idee, ein vernetztes Fahrzeug (vF) als virtuellen, mobilen Detektor, zu nutzen, verwendet. Ziel ist es mittels mehrerer vernetzter Fahrzeuge verkehrliche Größen sowie andere nicht vernetzte Fahrzeuge zu detektieren und zu bestimmen. Zunächst werden alle ausgearbeiteten Verfahren mit einer Vollausstattung von vernetzten Fahrzeugen simuliert. Eine 100prozentige Ausstattungsrate an vernetzten Fahrzeugen (100 AvF) würde bedeuten, dass von jedem einzelnen Fahrzeug bekannt ist, wo und in welchem Zustand es sich befindet. Ein Verfahren, um verkehrliche Größen mittels Daten einzelner vF festzustellen, wäre überflüssig. Eine 100prozentige Ausstattungsrate bedeutet, es wird eine optimale Bereitstellung und Auflösung von Datenpunkten und dem daraus resultierenden Verkehrszustand erzielt. Aus diesem Grund wird die 100prozentige Ausstattungsrate von vernetzten Fahrzeugen als Ausgangspunkt herangezogen. Später wird die Ausstattungsrate sukzessive verringert. Hierdurch sollen mögliche Grenzen hinsichtlich der Funktionstüchtigkeit der Verfahren in Bezug auf die Ausstattungsrate aufgezeigt werden.

Daten von Induktionsschleifen

Die Einbeziehung von Induktionsschleifen, z.B. zur Zustandserfassung oder als Ergänzung der Daten von vernetzten Fahrzeugen, wird in dieser Arbeit nur theoretisch betrachtet und findet folglich in der Simulation keine Anwendung. Die Benutzung von Induktionsschleifen ist in Hinblick auf die Verfügbarkeit begrenzt, da Induktionsschleifen nur stationär und nicht an allen Knotenpunkten verfügbar sind. Ihre Querschnitte sind somit fest vorgegeben. Dementsprechend liegt der Fokus in dieser Arbeit nur auf vernetzten Fahrzeugen und deren generierter Daten.

3 LITERATURRECHERCHE

3.1 DATENERHEBUNG IM STRAßENVERKEHR

Häufig werden mittels infrastruktureseitiger Sensoren an innerstädtischen Knotenpunkten Verkehrsdaten erhoben. Die Induktionsschleife stellt hierbei eines der dominierenden Systeme dar, da sie recht unempfindlich gegenüber Witterungseinflüssen ist [Lehnhoff] (S.15). Induktionsschleifen können im Zufluss einer Kreuzung verwendet werden, um im Straßenverkehr ankommende Fahrzeuge zu detektieren. Dies ermöglicht eine bedarfsgerechte Anpassung der Rot- und Grünzeiten [Tischler] (V).

Genrell gibt es drei unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten bei der Verwendung von Induktionsschleifen. Eine Induktionsschleife kann als Anforderungsschleife (Anforderung, Abb. 2) nahe der Haltelinie genutzt werden [Kobbeloer] (S.14).

Des Weiteren dient sie als Bemessungsdetektor bei der Bemessung von Phasenlängen. Hierbei wird aufgrund einer erfassten Zeitlücke zwischen zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen die aktuelle Phase verlängert oder früher beendet. [Tischler] (S.15)

Eine Induktionsschleife dient ebenfalls als Rückstaudetektor (Rückstaudetektor, Abb. 2), um Aufstauungen vor einer LSA feststellen zu können [FSGV RiLSA] (S.41).

Die Datenerhebung erfolgt bei einer Induktionsschleife nur stationär bzw. für einen bestimmten Querschnitt. Mit zunehmender Digitalisierung des Automobils steigt gleichzeitig die Anzahl an verbauten Sensoren (z.B. Radar) und Kommunikationseinrichtungen, wie z.B. die Internetanbindung eines Fahrzeuges. Zukünftig können somit auch die Daten dieser sich im Verkehr bewegender Fahrzeuge geteilt und verwendet werden.

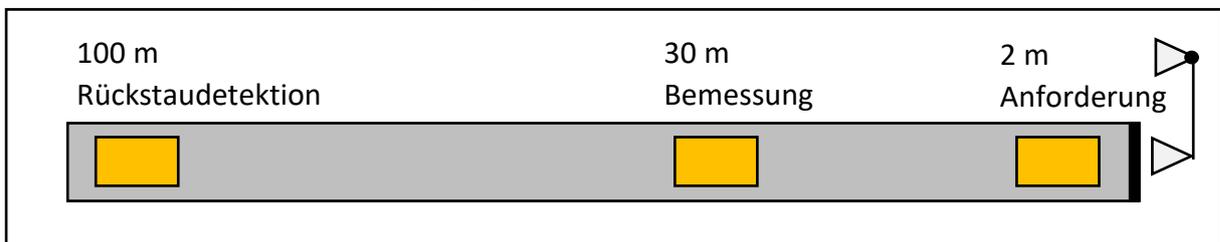


Abbildung 2: Lage von Induktionsschleifen vor einer LSA

3.2 DEFINITION EINES VERNETZTEN FAHRZEUGES

Ist ein Fahrzeug in der Lage, Daten zu teilen oder zu empfangen, spricht man von einem vernetzten Fahrzeug. Das heißt, das vernetzte Fahrzeug kann Daten für Sicherheits-, Mobilitäts- oder Umgebungsanwendungen mittels Dedicated Short Range Communications (DSRC) oder eines anderen drahtlosen Kommunikationssystems verschicken und empfangen [University of Virginia] (S.1).

Um Daten von Sensoren der Infrastruktur (Induktionsschleifen) und verkehrlichen Einrichtungen (LSA, Verkehrsschilder) sowie Verkehrsteilnehmern (vernetzte Fahrzeuge) sammeln und austauschen zu können, bedarf es eines intelligenten Transportsystems (ITS) (siehe Erklärung ETSI ITS).

3.3 ETSI ITS

Intelligente Transportsysteme (ITS) sind Systeme, die Informationen für den Transport von Gütern und Menschen bereitstellen sowie Kommunikationstechnologien, welche die Transportinfrastruktur und Transportmittel sicherer und effizienter gestalten [ETSI (2010)] (S.5). Eine einheitliche europäische Kommunikationsstruktur für ITS wurde von dem European Telecommunications and Standards Institute (ETSI) mit einer dazugehörigen referenzierten Architektur entwickelt (ETSI ITS) [Eckelmann et al.] (S.70). Mit dieser einheitlichen europäischen Kommunikationsstruktur des ETSI läuft die Kommunikation über sogenannte ITS-Stationen. Hierzu zählen mobile (Fahrzeuge, vehicle) oder feste Stationen (roadside Installationen, LSA, Sendemasten) zwischen denen kommuniziert werden kann.

Der ETSI ITS Standard bietet neben der direkten Kommunikation zwischen zwei Partnern die Möglichkeit, Informationen über mehrere Stationen geographisch zu verteilen. Dieser Mechanismus wird Multihop genannt. [ETSI (2010)] (S.6)

In ETSI ITS werden Informationen in Form unterschiedlicher Nachrichtentypen übertragen. Für jeden Nachrichtentyp ist eine einheitliche Syntax definiert, wie mit jedem Nachrichtentyp nach dem Empfang verfahren wird [ETSI (2014)] (S.7).

Für diese Arbeit sind hinsichtlich der Szenarien mit vernetzten Fahrzeugen im innerstädtischen Straßennetz zwei Nachrichtentypen relevant und essenziell. Hierzu zählen Cooperative Awareness Messages (CAM) Nachrichten, welche Informationen über Zustände von Verkehrsteilnehmern sowie der Straßeninfrastruktur liefern [ETSI (2014)] (S.7) und Signal Phase And Timing Extended Message (SPATM) Nachrichten, die Informationen über den Zustand von Lichtsignalanlagen liefern und bereitstellen [ETSI (2018)] (S.7-8).

Die direkte drahtlose Kommunikation im Straßenverkehr beinhaltet innerhalb der Kommunikationsumgebung von ETSI ITS zwei grundlegende Partner, die sich kategorisieren lassen. Die Bezeichnungen stehen für die Kommunikation zwischen mobilen und festen ITS Stationen, also zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur. Dies ist zum einen die direkte drahtlose Kommunikation von einem vernetzten Fahrzeug zur Infrastruktur (V2I) und zum anderen die direkte drahtlose Kommunikation von der Infrastruktur zu einem vernetzten Fahrzeug (I2V). Die direkte drahtlose Kommunikation zwischen zwei vernetzten Fahrzeugen wird als V2V bezeichnet [ETSI (2009)] (S.10). Die Kommunikation dieser beiden Partner basiert auf einem drahtlosen Netzwerk, welches V2X Netzwerk genannt wird und Bestandteil des Intelligenten Transportsystems (ITS ETSI) ist [ETSI (2014)] (S.7). V2X steht hier für vehicle to anything [Eckelmann et al.] (S.-70) und bedeutet, dass ein Fahrzeug mit den verschiedensten Teilnehmern des Straßenverkehrs kommunizieren kann.

3.3.1 Nachrichtentypen ETSI ITS

CAM

Cooperative Awareness Messages (CAMs) werden im ETSI ITS Netzwerk versendet. Cooperative Awareness bedeutet wörtlich übersetzt: Kooperative Wahrnehmung. Diese kooperative Wahrnehmung bezieht sich auf Verkehrsteilnehmer sowie auf die Straßeninfrastruktur. Wahrnehmung bedeutet in diesem Kontext, dass jeder Akteur des Straßenverkehrs über die Position, Bewegung und den Zustand der anderen informiert ist. Für die Verkehrssicherheit und Effizienz des Verkehrsablaufes ist die Wahrnehmung der Verkehrsakteure untereinander ein wichtiger Faktor. Der Austausch von Nachrichten innerhalb des ITS Netzwerkes, sprich CAMs, fördert die gegenseitige Wahrnehmung und das kooperative Verhalten von Straßennutzern. Eine CAM kann unterschiedliche Status und Attribute einer ITS Station enthalten, abhängig vom jeweiligen Typ der sendenden Station. CAMs von mobilen Stationen (Fahrzeugen) enthalten Informationen über aktive Systeme, Zeit, Position, Bewegungszustand. Hinzu kommen Informationen über die Ausmaße, Typ und Rolle des Fahrzeuges im Straßenverkehr. CAMs von festen Stationen enthalten nur den Typ und den Status der jeweils sendenden Station. [ETSI (2014)] (S.11)

Die übermittelten Informationen können für weitere ITS Anwendungen genutzt werden, z.B. für eine Kollisionswarnung. Detaillierte Ausführungen von weiteren Anwendungen findet man unter ETSI TR 102 638 V1.1.1 (2009-06) [ETSI (2009)].

SPATEM

Signal Phase And Timing Extended Message (SPATEM) sind Nachrichten, die im ETSI ITS Netzwerk von Lichtsignalanlagen verschickt werden und Informationen über den aktuellen Zustand der Lichtsignalanlage enthalten. [ETSI (2018)] (S.7-8) Dazu gehören die Phasen der Lichtsignalanlage und Informationen über Signalgeber der einzelnen Fahrstreifen und deren Signalbild [ISO2017] (S.8).

SPATEM können für Funktionen genutzt werden, mit denen z.B. Brems- und Anfahrvorgänge vermieden werden sollen. Dies wird in dem Projekt C-ROADS mit GLOSA (Green Light Optimal Speed Advisory) heute schon umgesetzt. Hierbei wird ein Green-Wave-Assistant sowie ein Deceleration Assistant auf der Grundlage von SPATEM betrieben. [C-Roads]

3.4 BESTEHENDE VERFAHREN UND UNTERSUCHUNGEN

Innerhalb des ETSI ITS V2X Netzwerkes werden CAM oder SPATM Nachrichten versendet. Die folgenden Verfahren bzw. Untersuchungen basieren auf den bekannten Rahmenbedingungen der V2X-Standarts ETSI. Die jeweiligen Untersuchungen befassen sich mit der Abschätzung des aktuellen Verkehrszustandes unter der Verwendung von vernetzten Fahrzeugen

3.4.1 Staulängenbestimmung mittels V2I-Daten unter Verwendung eines vernetzten Fahrzeuges als „mobilen“ und „virtuellen“ Detektor

In der Abhandlung von Priemer [Priemer et al.] wird ein vernetztes Fahrzeug (vF) als virtueller Detektor bezeichnet, da das vernetzte Fahrzeug virtuell als Detektor definiert wird. Bei Gao [Gao et al.] hingegen wird ein vernetztes Fahrzeug als mobiler Detektor genannt, da das vF ständig seine Position verändern kann und frei beweglich im Verkehr ist. Jedoch beschreiben beide Bezeichnungen „mobil“ sowie „virtuell“ die gleiche Verwendung des vF. Das vernetzte Fahrzeug wird zur Staulängenbestimmung vor einer LSA herangezogen. Des Weiteren dienen die Daten des vF und der LSA zur Approximation der Staulänge hinter dem jeweiligen Fahrzeug. Für die Approximation der Staulänge werden aktuelle sowie auch historische V2I-Daten verwendet. Bei Gao wird zusätzlich ein neuronales Netzwerk für die Bestimmung der Staulänge verwendet. Die aktuellen Daten des vF (aktuelle Geschwindigkeit und GPS-Position) werden über WLAN an die LSA übermittelt. In den Untersuchungen werden geringere Ausstattungsraten als eine Vollausrüstung von vernetzten Fahrzeugen (vF) betrachtet und untersucht. Priemer betrachtet jeweils nur ein vF in der Aufstauung vor der LSA. Gaos Untersuchung fand unter der Varianz der AvF von 70% bis 10% statt.

[Priemer et al.] [Gao et al.]

Die Idee, ein vernetztes Fahrzeug als „virtuellen“ „mobilen“ Detektor zu nutzen, erscheint sinnvoll. Trifft ein vernetztes Fahrzeug auf ein Stauende, bestimmt es selbst die Staulänge L_1 (Abbildung 3) und somit ist auch die Berechnung der Wartezeit an der LSA für dieses Fahrzeug möglich. Unter Einbezug des LSA-Programms und dessen Schaltzeiten kann die Ankunftsrate während der Rotzeit bestimmt/geschätzt werden und somit L_2 (Abbildung 3), L_2 ist die Aufstauung stromaufwärts hinter dem vernetzten Fahrzeug. Des Weiteren erfolgt mithilfe von L_1 und L_2 die Schätzung der aktuellen maximalen Staulänge vor der Lichtsignalanlage. [Priemer et al.]

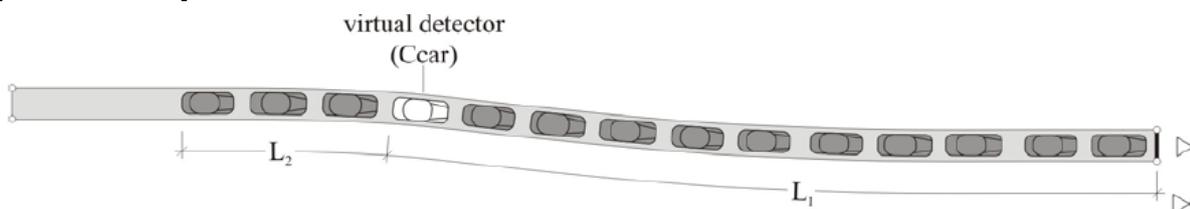


Figure 4. queue length L

$$L = L_1 + L_2 \quad (5)$$

where:

L : entire queue length

L_1 : distance virtual detector and stop line

L_2 : distance between tailback's end and virtual detector

Abbildung 3: „Virtueller“ Detektor [Priemer et al.] (S.5)

Auf Grundlage der Staulängenapproximation können z.B. Schaltzeiten einer Lichtsignalanlage optimiert werden. Kraftfahrzeugfahrern kann individuell die optimale Geschwindigkeit vorgegeben werden, sodass sie Knotenpunkte ohne bzw. mit möglichst wenigen Halten passieren können. Dadurch wird die Effizienz des Verkehrsablaufes an einer LSA erhöht und negative externe Effekte können verringert werden. [Priemer et al.] (S.1)

3.4.2 Moving Observer

Im Zusammenhang mit der Definition von Floating-Car-Data wurde der Begriff „Floating Car Observer (FCO)“ entwickelt. Floating-Car-Data ist die Erfassung und Beschreibung des individuellen Fahrverlaufes von einzelnen Fahrzeugen, um somit Rückschlüsse auf den Verkehrsablauf ziehen zu können [Kühnel et al.] (S.2). Ein FCO besitzt neben seiner Funktion als FCD-Lieferant die zusätzliche Aufgabe, über seine interne Sensorik die eigene Umgebung zu beobachten [Kühnel et al.] (S.10). Die Beobachtung, bzw. Detektion kann mittels verschiedener Sensoren erfolgen. Hierzu zählen z.B. verschiedene Ansätze der Videodetektion, infrarotbasierte Kennzeichenerkennung, Radarmessung, Schallpegelmessung oder Laserscanner. Um verkehrsbezogene Daten aus den sensorisch physikalisch erfassten Kenngrößen ableiten zu können, muss der genutzte Algorithmus jeweils auf den Sensortyp abgestimmt sein. [Kühnel et al.] (S.106)

In einem ersten Feldversuch untersuchte Neumann den FCO mittels Beobachtung des Gegenverkehrs auf einer einbahnigen zweistreifigen außerörtlichen Straße. Einem Bus des öffentlichen Personennahverkehrs der Verkehrsbetriebe GmbH Magdeburg wurde eine infrarotbasierte Kennzeichenerkennung eingebaut, um den Gegenverkehr detektieren/beobachten zu können (Abbildung 4) [Naumann et al.] (S.23).

Mit jedem aufgenommenen Bild findet eine Kennzeichenerkennung statt. Somit kann über mehrere aufgenommene Bilder, in denen das gleiche Nummernschild detektiert wird, die Geschwindigkeit, geographische Lokation und Fahrtrichtung eines entgegenkommenden Fahrzeuges bestimmt werden. Dies geschieht auf Grundlage der Veränderung von Lage und Ausmaße eines Nummernschildes über mehrere Bilder hinweg. Die Daten über das entgegenkommende Fahrzeug werden über eine drahtlose Kommunikation (z.B. GPRS) an ein Verkehrsmanagementcenter übermittelt. Dort werden die einzelnen Nachrichten verarbeitet und kombiniert, um daraus eine aktuelle Verkehrslage zu bestimmen. [Naumann et al.] (S.21)

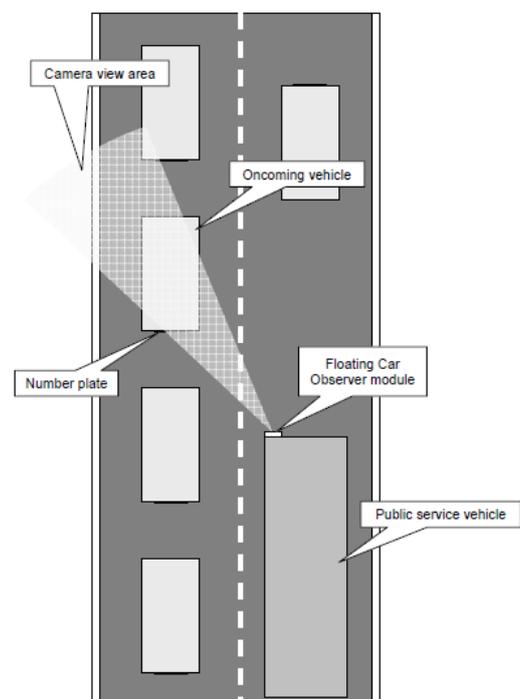


Abbildung 4: Moving Observer
[Naumann et al.] (S.20)

3.4.3 Virtuelle Induktionsschleife basierend auf kooperativer Fahrzeugkommunikation

Die virtuelle Induktionsschleife ist ein simples Verkehrsmonitoringsystem, welches auf kooperative Fahrzeugkommunikation beruht. Virtuelle Induktionsschleifen werden definiert und deren Positionen werden mittels roadside units (RSUs) entlang einer Strecke über drahtlose

Nachrichten angekündigt. Die virtuelle Induktionsschleife kann an jedem beliebigen Straßenquerschnitt definiert werden, über den man Daten erheben möchte. Vernetzte Fahrzeuge, welche sich auf der Strecke bewegen, empfangen nun von einer RSU die Lage der virtuellen Induktionsschleife (a, Abbildung 5).

Mittels Global Positioning System (GPS) registriert ein vernetztes Fahrzeug, wenn es die virtuelle Induktionsschleife passiert. Zu diesem Zeitpunkt erhebt das Fahrzeug Informationen seines aktuellen

Zustandes, wie z.B. aktuelle Zeit, Geschwindigkeit und benutzten Fahrstreifen (b, VehicleA, Abbildung 5). Kommt es nun in die Reichweite der nächsten RSU, übermittelt es seine erhobenen Daten (Informationen von der Position des virtuellen Detektors, Position a, Abb. 5, (b)) an die zweite RSU-Einheit (c, Abbildung 5). Dies stellt eine simple und flexible Lösung dar, da die virtuellen Induktionsschleifen schnell und überall definiert werden können. Der Kommunikationsaufwand wird geringgehalten, da nur für bestimmte Querschnitte/Positionen Daten versendet und erhoben werden. Es ist eine konservative Methode zur Nutzung von V2X, bei der man die Datenmenge bei der Kommunikation geringhält, in dem man nur punktuell Daten erhebt. Die Sämtliche drahtlose Kommunikation läuft hier über ITS Stationen des ETSI Standards. Alle Nachrichten werden als CAM-Nachrichten versandt. [Gramaglia et al.](S.1467-1476)

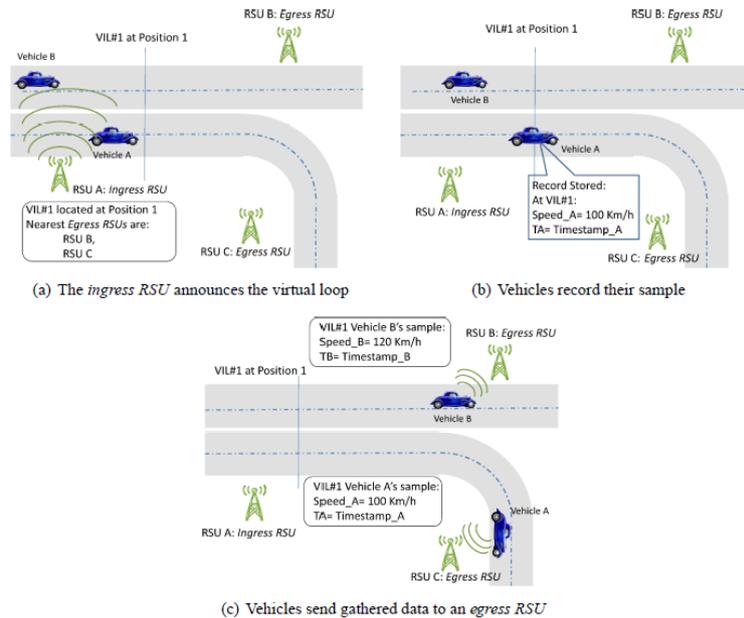


Abbildung 5: Virtuelle Induktionsschleife
[Gramaglia et al.] (S.1470)

3.4.4 Vernetztes Fahrzeug als Sensor sowie Aktor

Ein vernetztes Fahrzeug soll gleichzeitig als Sensor und Aktor genutzt werden. Dies ermöglicht einer Verkehrsleitzentrale aktuelle Verkehrsdaten zu erhalten (Funktion als Sensor) sowie mit Steuerung von vernetzten Fahrzeugen, den Verkehrsfluss zu beeinflussen (Funktion als Aktor). Roncoli untersuchte dieses in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation anhand eines Autobahnscenarios mittels verschiedener Ausstattungsgraden an vernetzten Fahrzeugen. Die Beeinflussung des Verkehrs findet hier über das ACC (adaptive cruise control) eines jeden vernetzten Fahrzeuges statt. Hierbei kann die Geschwindigkeit sowie das Spurwechselverhalten der einzelnen vernetzten Fahrzeuge beeinflusst werden. Daraus resultiert wiederum eine Beeinflussung des gesamten Verkehrsablaufes. [Roncoli et al.] (S. 452 – 461)

4 SIMULATIONSSOFTWARE

4.1 MIKROSKOPISCHE VERKEHRSFLUSSSIMULATIONEN

Mikroskopische Verkehrsflusssimulationen werden für die Untersuchung und Bewertung von baulichen sowie organisatorischen Maßnahmen hinsichtlich ihrer verkehrlichen Wirkungen und Einfluss herangezogen [FSGV HmV] (S.5). Zudem sind mikroskopische Verkehrsflusssimulationen sehr kosteneffizient und sie sind schneller als Testfeldumsetzungen in der Realität [Park et al.] (S.185). In einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation werden die Interaktionen zwischen den Fahrzeugen, aber auch die individuellen Eigenschaften verschiedener Fahrer und Fahrzeugen nachgebildet und ein Fahrzeug ist das kleinste Element des Systems [FSGV HmV] (S.6). „Die Regeln, nach denen sich die Fahrzeuge bewegen und interagieren (z.B. Geschwindigkeits- und Fahrstreifenwahl) sind in Form von Rechenalgorithmen in den Verhaltensmodellen festgelegt“ [FSGV HmV] (S.6). Eine mikroskopische Verkehrsflusssimulation ist daher prädestiniert für die Simulation von vernetzten Fahrzeugen und deren generierten Daten. Somit können die erarbeiteten Verfahren dieser Arbeit innerhalb einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation untersucht werden. Für die Untersuchung kommt die Simulationssoftware SUMO des DLRs zum Einsatz.

4.2 SUMO - SIMULATION OF URBAN MOBILITY

SUMO [SUMO a] ist ein kostenloses Open Source Verkehrssimulationsprogramm, welches seit 2001 vom DLR zur Verfügung gestellt wird. SUMO kann zum Modellieren von intermodalen Verkehrssystemen des Straßenverkehrs, des öffentlichen Personenverkehrs sowie Fußgängern genutzt werden. SUMO enthält ebenfalls Anwendungen bezüglich Routenfindung, Visualisierung, importieren von Netzen und Kalkulation von Emissionen. Simulationen können über verschiedene APIs kontrolliert und beeinflusst werden. Mittels Modellen der Anwender kann SUMO erweitert werden. [SUMO b] Die Anwendung "Traffic Control Interface" (TraCI) ist besonders interessant für diese Arbeit.

Während einer Verkehrssimulation können mittels TraCI „online“ Werte von simulierten Objekten abgerufen und verändert werden. Somit ist eine Simulation von Infrastruktur und Vernetzung von Fahrzeugen möglich, da mit TraCI „online“, Werte abgegriffen und verarbeitet werden können [SUMO c]. Die Umsetzung des Programmiercodes geschieht auf einer Eclipse-Plattform mittels der Programmiersprache Python. Die Auswertung und Visualisierung finden in Microsoft Excel statt.

SUMO wird also genutzt, um Rückschlüsse hinsichtlich einer Umsetzung von Verfahren zur Bestimmung des Verkehrszustandes mittels vernetzter Fahrzeuge in Bezug zur Realität ziehen zu können.

5 ANNAHMEN

5.1 KOMMUNIKATION

Alle erarbeiteten Verfahren werden von einer zentralen Rechereinheit umgesetzt, das bedeutet, Lichtsignalanlagen und vernetzte Fahrzeuge senden ihre Daten an die Recheneinheit. Diese Daten werden von der Recheneinheit zentral gesammelt und für die Verfahren verarbeitet. Alle aktuellen Daten werden somit an einem Ort gesammelt und man benötigt nur eine große zentrale Recheneinheit.

Die Daten können auch lokal an einer Kreuzung erhoben werden, hier aggregiert werden und erst danach an einen zentralen Rechner/Einheit gesendet werden. Man erzeugt somit ein Gesamtbild der Verkehrslage aus vielen einzelnen Verkehrslagen. Der Datenverkehr sowie auch die Datenmengen wären nun geringer. Man müsste aber eine erhöhte lokale Rechenkapazität vorhalten. Dieses könnte wiederum zu eventuellen Matching-Problemen an lokalen Grenzen führen.

Vernetzte Fahrzeuge versenden CAMs über ihren aktuellen Zustand an einen Rechner (V2I). Die Daten von Lichtsignalanlagen werden mithilfe von SPATEM Nachrichten verschickt. Zum einen erfolgt der Datenfluss von der LSA hin zum Rechner und zum anderen über eine Infrastructure-to-Vehicle (I2V) Kommunikation von der LSA zum vF. Das bedeutet, vernetzte Fahrzeuge können direkt Daten einer LSA abgreifen und verarbeiten.

In dieser Arbeit werden Verfahren erarbeitet, um verkehrliche Größen mittels vernetzter Fahrzeuge feststellen zu können. Aus diesem Grund wird die Kommunikationsinfrastruktur nicht genauer betrachtet und als funktionstüchtig angesehen. Das setzt eine hohe Abdeckung voraus. Jedes vorhandene vernetzte Fahrzeug kann registriert und erkannt werden. Es erfolgt keine Begrenzung beim Senden, Empfangen und Bearbeiten von Nachrichten. Es besteht auch keine Reichweiteneinschränkung beim Senden und Empfangen von Nachrichten.

5.2 LICHTSIGNALANLAGEN

Alle Lichtsignalanlagen besitzen einen Signalzeitenplan mit einer Festzeitsteuerung. Sie sind also nicht verkehrsabhängig, da für sie stets die gleichen Schaltzeiten laufen.

5.3 FAHRZEUGE

Alle Fahrzeuge weisen die gleiche Fahrzeuglänge von fünf Metern auf sowie einen minimalen Sicherheitsabstand von drei Metern (3 m Simulation generisches Netz / 2,5 m Simulation Braunschweiger Netz), zu anderen Fahrzeugen in einer Aufstauung auf. Längere bzw. größere Fahrzeuge werden nicht betrachtet, im Fokus stehen ausschließlich PKW. Die Fahrzeugsensorik, wie z.B. das Radar und GPS, wird als störungsfrei und funktionstüchtig angenommen.

6 VERFAHREN

6.1 AUSWERTEDIMENSIONEN

Abbildung 6 zeigt alle verkehrlichen Größen, die für einen Fahrstreifen einer Strecke bestimmt werden.

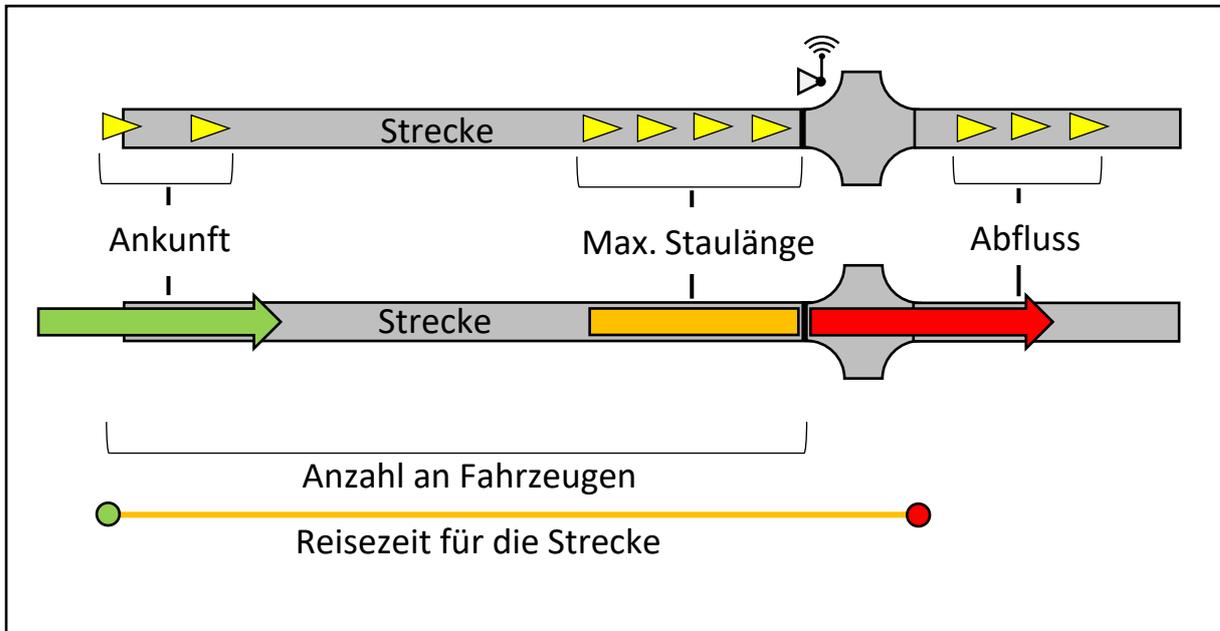


Abbildung 6: Definierte verkehrliche Größen - Auswertedimensionen

Maximale Staulänge: Die maximale Staulänge gibt die Länge an aufgestauten Fahrzeugen vor signalisierten oder vorfahrtsregelungen Knotenpunkten an, gemessen in Metern

Ankunft: Zur Ankunft zählen alle Fahrzeuge, die in einem bestimmten Intervall, Zeitraum oder LSA-Umlaufzeit auf einer Strecke ankommen.

Abfluss: Der Abfluss gibt Auskunft über die Anzahl an Fahrzeugen, die während einer Freigabe, ausgehend von einem Fahrstreifen, den signalisierten Knotenpunkt passieren können.

Anzahl an Fahrzeugen: Die Anzahl an Fahrzeugen beinhaltet alle Fahrzeuge, die sich auf einem Fahrstreifen einer Strecke befinden. Dazu zählen stehende sowie sich bewegende Fahrzeuge.

Definition der Reisezeit: Als Reisezeit wird die Zeit bezeichnet, die ein Fahrzeug zum Befahren einer Strecke/Fahrstreifens von dessen Startpunkt (Start der Reisezeit, Abb. 7) bis zum Startpunkt des nächsten Abschnittes (Ende der Reisezeit, Abb. 7) benötigt. Hierzu zählt ebenfalls die Knotenpunktüberfahrt. Dies bedeutet, dass auch Werte von bedingtverträglichen Strömen bezüglich anderer vorfahrtsberechtigter Ströme hierbei berücksichtigt werden. In dieser Arbeit wird die Reisezeitbestimmung für alle im Netz befindlichen Fahrzeuge für die Auswertung angewandt. Dies gilt für vernetzte

Fahrzeuge, die ihre Reisezeit selbst bestimmen können, wie auch für nicht vernetzte Fahrzeuge.

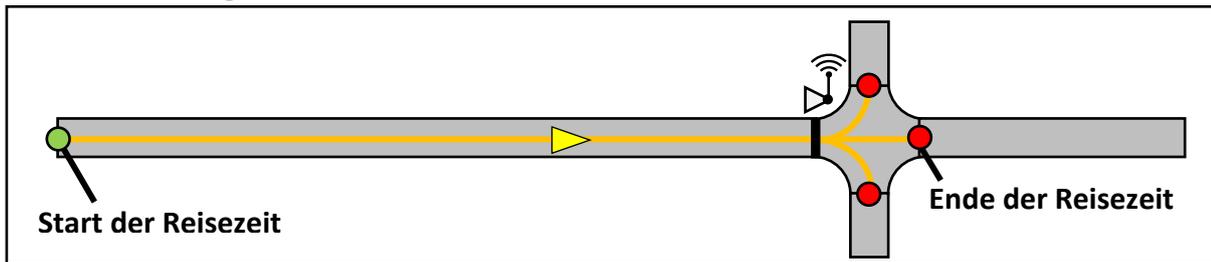


Abbildung 7: Reisezeit

6.2 VERFAHREN – MIT VERNETZTEN FAHRZEUGEN

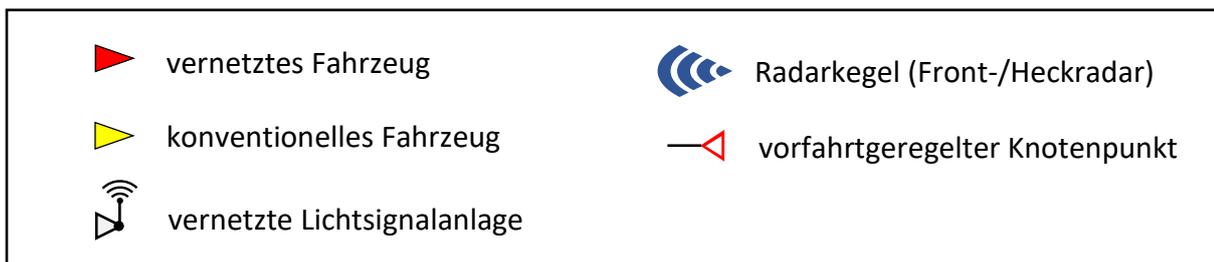


Abbildung 8: Legende für die Abbildungen der Verfahren

6.2.1 Bestimmung der maximalen Staulänge - mit LSA

Zur Bestimmung der maximalen Staulänge wird jeweils das letzte vF (Car Stau, Abb. 9) einer Aufstauung vor einer Lichtsignalanlage (LSA) herangezogen. Zunächst wird eine Staugeschwindigkeit (v -Stau = 0,2 m/s) definiert. Unterschreitet ein vF diese Geschwindigkeit, so bestimmt und meldet es seine Position/Distanz zur LSA auf der Strecke an einen Rechner. Der Rechner bestimmt nun das Fahrzeug, welches sich am weitesten stromaufwärts befindet und zum Stehen gekommen ist ($v \leq 0,2$ m/s). Die maximale Staulänge setzt sich aus der Entfernung dieses Fahrzeuges zur LSA zuzüglich seiner Fahrzeuglänge zusammen. Hat ein vF seine Distanz gesendet, kann vorerst keine neue Positionsmeldung von ihm erfolgen. Erst wenn dieses vF die Staugeschwindigkeit erneut überschreitet, kann es seine Distanz/Position wieder melden. Vernetzte Fahrzeuge, die sich in der Aufstauung stromabwärts vor dem vernetzten Fahrzeug Car Stau (Abb. 9) befinden, sind irrelevant für die Staulänge und werden somit nicht mehr zur Datenverarbeitung herangezogen. Lediglich Daten des vernetzten Fahrzeuges Car Stau und folgender vernetzter Fahrzeuge stromaufwärts (Car 2, Car 3, Abb. 9) können zur Datenverarbeitung herangezogen werden. Die Distanz-/Positionsmeldung ermöglicht ebenfalls eine Schätzung der Anzahl an Fahrzeugen in einer Aufstauung vor der LSA. Bei der Berechnung der maximalen Staulänge wird von einer standardisierten Fahrzeuglänge von fünf Meter pro Fahrzeug zuzüglich eines minimalen Sicherheitsabstandes von drei Meter ausgegangen.

$$l_{stau,e} = d_{v,e}; \text{ wenn } s_v \leq s_{min} \quad (1)$$

e: Kante

v: Messfahrzeug (CarStau) für das gilt: $d_{v,e} = \max(d_{k,e})$ für alle k in K (Menge vF auf Kante e)

$l_{stau,e}$: max. Staulänge auf Kante e

s_v : Geschwindigkeit des Messfahrzeugs v

s_{min} : Staugeschwindigkeit

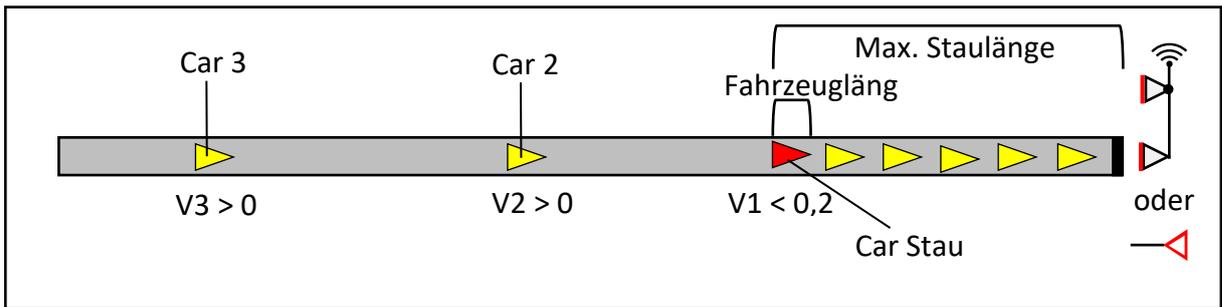


Abbildung 9: Max. Staulänge

Vermeidung einer Stauwellendetektion

Eine sehr lange Aufstauung vor einer LSA kann zu dem Phänomen einer „Stauwelle“ führen. Hierbei fahren im vorderen Teil (Abb. 10) die ersten Fahrzeuge bereits an, da sie eine Freigabe erhalten. Im hinteren Teil jedoch stehen noch alle Fahrzeuge. Die fahrenden Fahrzeuge „wandern“ einmal stromaufwärts. Wird nun die Methode zur maximalen Staulängenbestimmung angewandt, führt die Mitbestimmung der freien Räume (L1, L2, L3; keine Detektion, Abb. 11) zu einer Ungenauigkeit in der Bestimmung. Zum einen wird der Wert bei der Bestimmung/Schätzung der maximalen Staulänge und der daraus resultierenden Anzahl der Fahrzeuge in der Aufstauung verfälscht und zum anderen führt dies zu einer Ungenauigkeit der Reisezeitprognose, da diese auf der maximalen Staulänge basiert. Es werden daher zwei Mechanismen erarbeitet, um dieses zu verhindern.

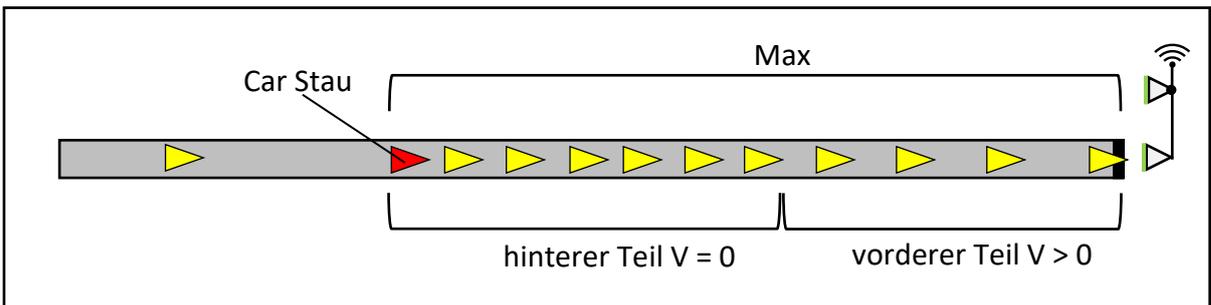


Abbildung 10: „Stauwelle“

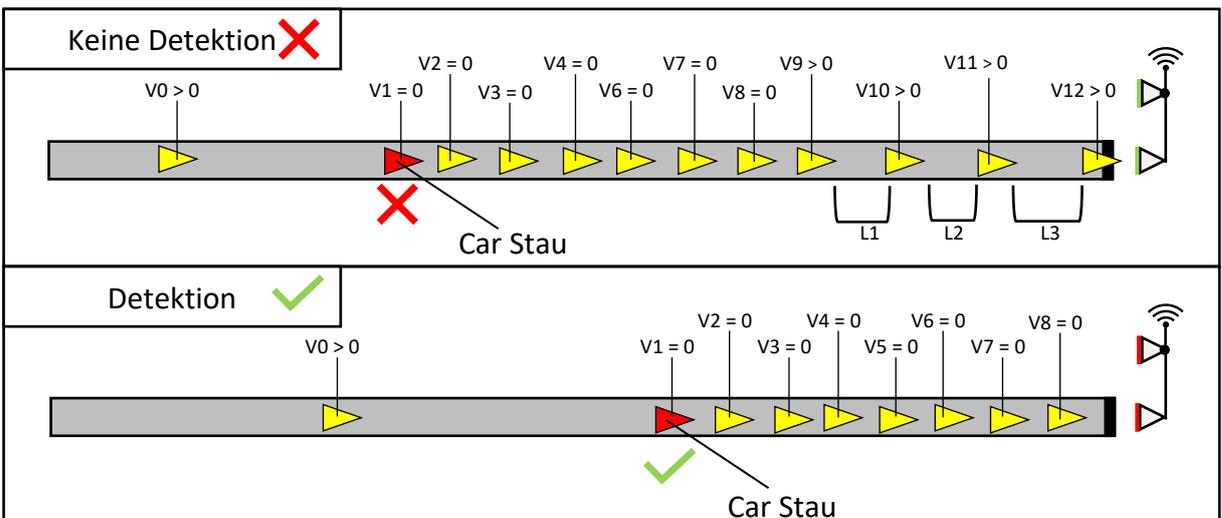


Abbildung 11: Vermeidung der Detektion einer Stauwelle

Der **erste Mechanismus** gibt vor, dass eine maximale Staulänge nur bestimmt werden darf, wenn die betreffende LSA Rot oder Gelb signalisiert. Hierbei ist für eine „gewisse Staulänge“ sichergestellt, dass alle Fahrzeuge stehen, oder demnächst zum Stehen kommen, wenn die maximale Staulänge bestimmt wird. Das heißt, während die LSA Grün signalisiert, kann keine maximale Staulänge bestimmt werden. Somit wird eine fehlerhafte Bestimmung (von L1, L2, L3; Abb. 11) verhindert, jedoch nur bis zu einer „gewissen Staulänge“. Der Punkt der „gewissen Staulänge“ ist erreicht, wenn die Stauwelle nicht vor Ende der Freigabezeit das für die letzte Staulängenbestimmung genutzte Fahrzeug Car Stau aus Abbildung 9 erreicht.

Der **zweite Mechanismus** greift bei Aufstauungen, die über die „gewisse Staulänge“ hinaus gehen. Bei jeder Staulängenbestimmung wird überprüft, ob sich die verentzten Fahrzeuge vor Car Stau stromabwärts bewegen. Ist eines der vF stromabwärts schneller als die Staugeschwindigkeit, wird die Datenverarbeitung des vernetzten Fahrzeuges Car Stau (Abb. 11) so lange geblockt, bis alle vF vor diesem zum Stehen kommen (Detektion, Abb. 11). Dieser Mechanismus ist demzufolge auf mehrere vernetzte Fahrzeuge innerhalb der Aufstauung angewiesen. Das bedeutet, der zweite Mechanismus greift bei nur einem vernetzten Fahrzeug in einer Aufstauung nicht.

$$l_{stau,e} = d_{v,e}; \text{wenn } s_v \leq s_{min} \cap p_e \in \{r, y\} \cap v_{l,e} \leq v_{min} \forall l \in L \quad (2)$$

Erweiterung der Formel (1) um zwei weitere Bedingungen:

p_e : Signalisierungszustand der LSA von Kante e

L : Menge aller vF, bei denen gilt $d_{k,e} < d_{v,e}$

$v_{l,e}$: Geschwindigkeit von Fahrzeug l auf Kante e

Um den Nachrichtenaufwand für den zweiten Mechanismus möglichst gering zu halten, kann ein vF dem Rechner signalisieren, dass es Informationen über die stromabwärts vorausfahrenden Fahrzeuge erhalten möchte. Aufgrund der Statusmeldungen ist der Rechner in der Lage, über alle im Netz befindlichen vF Auskunft erteilen zu können, bzw. diese Anfrage zu überprüfen und nur einen True oder False Wert zu versenden. Der Austausch von Informationen wird somit auf zwei Nachrichten zwischen vF und Rechner minimiert/optimiert. Beide Mechanismen ergänzen sich perfekt. Der erste Mechanismus kann für mäßige Aufstauungen und geringen AvF genutzt werden. Der zweite Mechanismus kommt bei sehr langen Aufstauungen und höheren AvF zum Einsatz.

Für diese Untersuchung werden alle Fahrzeuge mit der gleichen Fahrzeuglänge von fünf Metern bemaßt und einem Sicherheitsabstand von drei Metern zueinander simuliert. Im realen Straßenverkehr variieren die Fahrzeuglängen und die Sicherheitsabstände natürlich. Somit können zur Korrektur bzw. Anpassung der Abschätzung über die Anzahl von Fahrzeugen innerhalb einer Aufstauung unterschiedliche Standardlängen für bestimmte Fahrzeugklassen verwendet werden. Informationen über die Fahrzeugklasse sind heute schon in Nachrichten im ETSI ITS berücksichtigt und vordefiniert [ETSI (2014)] (S.11).

6.2.2 Bestimmung der maximalen Staulänge - ohne LSA

Das am weitesten stromaufwärts haltende vF ($V \leq$ Staugeschwindigkeit) wird für die Staulängenbestimmung herangezogen. Es können nur Daten von Car Stau (Abb.9) oder Daten von vernetzten Fahrzeugen (Car 2, Car 3, Abb.9), die sich stromaufwärts vor Car Stau (Abb.9) befinden, für eine erneute Staulängenbestimmung verarbeitet werden. Für eine Strecke ohne LSA existiert kein Mechanismus, um fehlerhafte Bestimmungen der maximalen Staulänge zu

verhindern. Lücken (L1, L2, L3) wie in Abbildung 11 beschrieben, werden also mit detektiert. An einem vorfahrtsgeregelten Knotenpunkt sind Fahrzeuge stetig zum Aufrücken in Bewegung. Eine gewisse Fehlertoleranz in Bezug auf die Staulänge muss hier akzeptiert werden.

6.2.3 Abflussbestimmung - mit LSA

Ein vernetztes Fahrzeug, welches sich in einer Aufstauung vor einer LSA befindet, ist in der Lage Fahrzeuge, die während einer Freigabe (Umlaufzeit der LSA) die Haltelinie der LSA passieren, zu detektieren. Vorausgesetzt dieses vF verweilt mindestens zwei Umläufe, d.h. jeweils von Rotende bis Rotende, vor der LSA. Sobald das vF auf das Stauende trifft und zum Stehen kommt, bestimmt es die eigene Entfernung/Position zur LSA (S_1 , Car 1, Abb. 12). Hierbei greift nun der gleiche Mechanismus wie bei der maximalen Staulängenbestimmung aus Kapitel 6.2.1. Fährt das vernetzte Fahrzeug erneut an und kommt wieder zum Stehen, bestimmt es nochmals seine Distanz zur LSA (Car 1, S_2 , Abb. 12). Diese beiden Distanzen werden nun miteinander verrechnet bzw. voneinander subtrahiert. Die Differenz gibt somit die zurückgelegte Strecke in Metern an. Dies wird als Abfluss während einer Freigabe bezeichnet (gemessen in Metern), da diese Distanz zwischen zwei Freigaben zurückgelegt wird. Um möglichst aktuelle Werte zu erhalten, werden jeweils Daten des vernetzten Fahrzeuges herangezogen, welches sich am nächsten stromabwärts zur Haltelinie befindet. Überschreitet ein vF die Haltelinie, wird das nächstfolgende vernetzte Fahrzeug stromaufwärts für die Abflussbestimmung herangezogen.

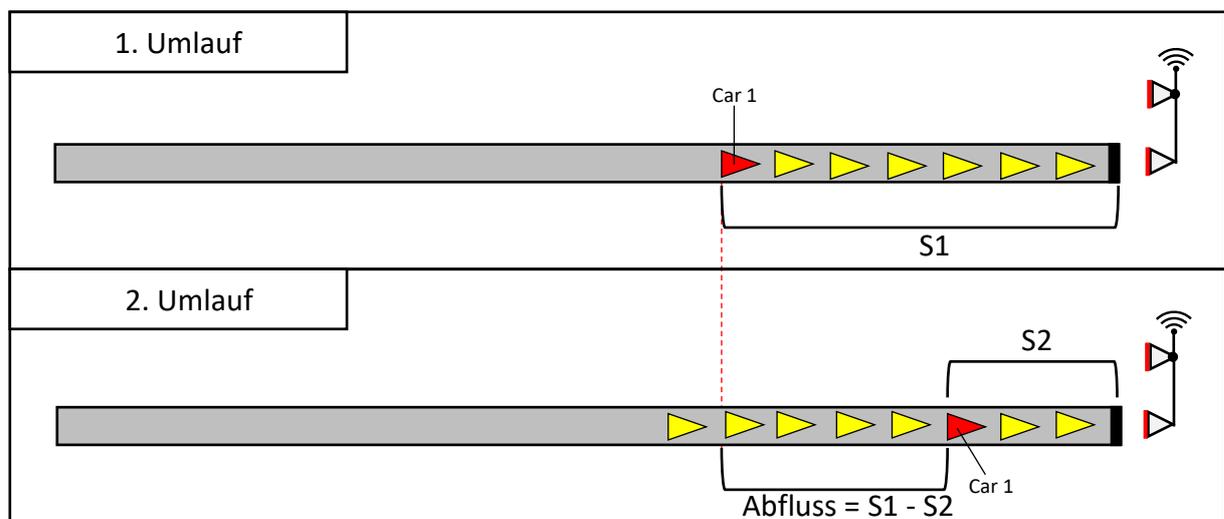


Abbildung 12: Abfluss

6.2.4 Verfahren Ankunft 1, Ankunft 2 und Ankunft 3

Die in einem bestimmten Intervall auf einer Strecke eintreffenden/ankommenden Fahrzeuge werden als Ankunft bezeichnet. Mit dem Ankunftsverfahren wird die Länge (gemessen in Metern) der ankommenden Fahrzeuge in einem vordefinierten Intervall bestimmt. Mittels dieser Länge erfolgt eine Hochrechnung über die Verkehrsbelastung an Fahrzeugen pro Stunde, für das betrachtete Intervall. Daraus resultiert die verkehrliche Größe Kfz/h (Verkehrsbelastung).

6.2.4.1 Ankunft 1 Verfahren- mit LSA

Ankunft 1 errechnet sich aus der Staulänge und dem Abfluss, jeweils pro Umlauf der LSA gemessen in Metern. Dazu zählen die aktuelle maximale Staulänge (S2, 2. Umlauf, Abb. 13) während der Rotzeit des aktuellen Umlaufs (2. Umlauf), die maximale Staulänge (S1, 1. Umlauf, Abb. 13) während der Rotzeit des letzten Umlaufes (1. Umlauf) sowie der aktuelle Abfluss (A1, 2. Umlauf, Abb. 13). Die Bestimmung von Ankunft 1 erfolgt stets nach Rotende, nach erfolgter Bestimmung des Abflusses sowie nach erfolgter maximalen Staulängenbestimmung. Daraus ergibt sich:

$$\text{Ankunft pro Umlauf [m]} = (\text{alte max. Staulänge [m]} (S1) - \text{aktuelle max. Staulänge [m]} (S2)) + \text{Abfluss [m]} \quad (3)$$

Die Formel sagt aus, wie viele Fahrzeuge pro Umlauf angekommen sind. Zur Bestimmung von Ankunft 1 sind mindestens zwei vernetzte Fahrzeuge erforderlich, gegebenenfalls können es aber auch drei sein. Ein vF sendet Daten zur Berechnung der aktuellen maximalen Staulänge (z.B. Car 2, Abb. 13). Das zweite vF liefert Daten zur Bestimmung der alten Staulänge und des aktuellen Abflusses (z.B. Car 1, Abb. 13). Die Erhebung dieser Daten (Abfluss und max. Staul. alt) könnte auch mittels zweier unterschiedlicher Fahrzeuge umgesetzt werden (z.B. Car 1 bestimmt die max. Staulänge S1 / ist Car 3 auch vernetzt, bestimmt es den Abfluss A1).

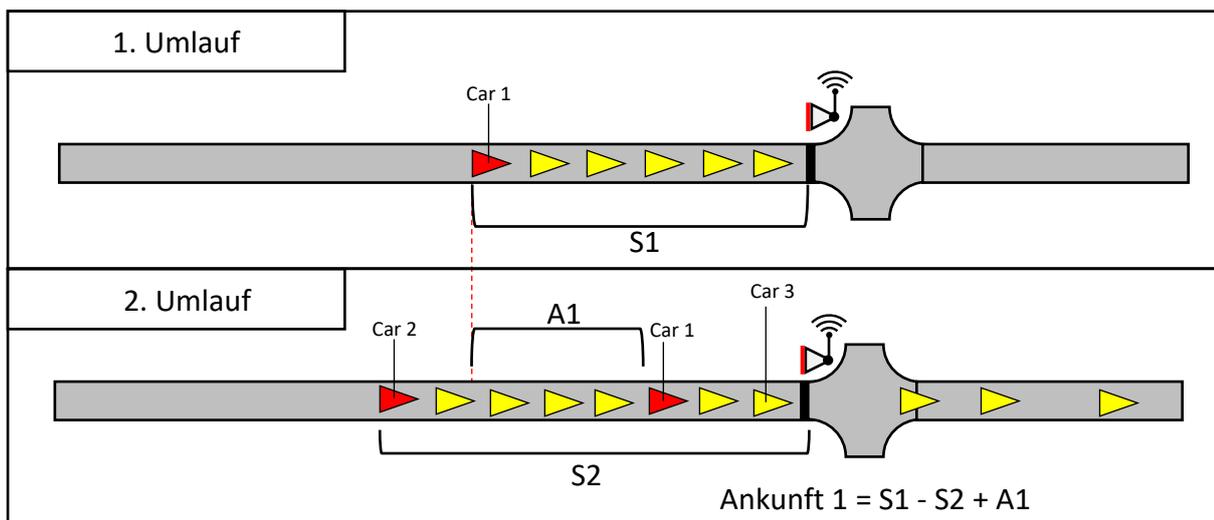


Abbildung 13: Ankunft 1

6.2.4.2 Ankunft 2 Verfahren - mit LSA

Zwischen zwei vernetzten Fahrzeugen wird die Entfernung bestimmt und somit wie viele Fahrzeuge in einem Umlauf angekommen sind. Das erste Fahrzeug (Car 1, 1. Umlauf, Abb. 14), welches als erstes nach Grünende auf das Stauende trifft, wird gespeichert. Nach erfolgtem Umlauf und erneutem Grünende wird das letzte stromaufwärts haltende Fahrzeug (Car 2, 2. Umlauf, Abb. 14), welches die letzte Staulänge bestimmt hat, gespeichert. Wichtig ist, dass sich beide Fahrzeuge bei der Bestimmung von Ankunft 2 noch auf der Strecke befinden. Nun wird von beiden Fahrzeugen die Position bestimmt. Da Car 1 (2. Umlauf, Abb. 14) das letzte haltende vF des 1. Umlaufes war und Car 2 (Abb. 14) das letzte haltende vF des 2. Umlaufes ist, befinden sich zwischen beiden vernetzten Fahrzeugen alle Fahrzeuge, die während eines Umlaufes die LSA erreicht haben (Abbildung 14). Nun ist die Entfernung zwischen den beiden Fahrzeugen die Länge/Anzahl an Fahrzeugen, die innerhalb eines Umlaufes angekommen sind. Auch hier wird jeweils der Durchschnitt der letzten beiden bestimmten Werte berechnet.

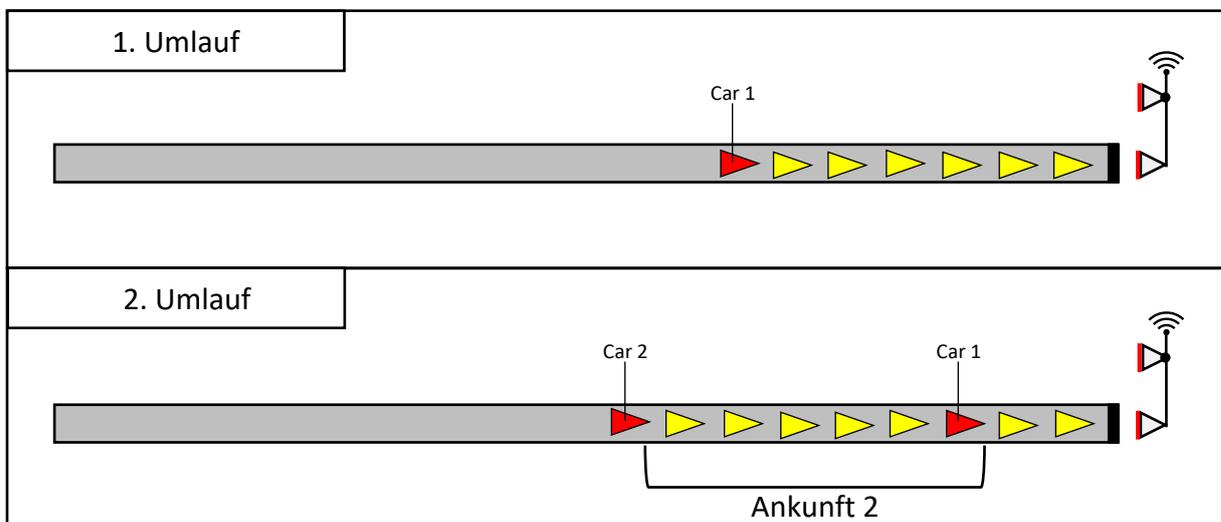


Abbildung 14: Ankunft 2

6.2.4.3 Ankunft 3 Verfahren - mit LSA sowie ohne LSA

Das Verfahren ähnelt dem Verfahren Ankunft 2 aus 6.2.4.2. Für Ankunft 3 wird die Ankunft über einen Intervall bestimmt. Dies ist für eine Strecke mit LSA die Umlaufzeit. Für eine Strecke ohne LSA wird die Ankunft hier über ein Intervall von 60 Sekunden erhoben.

Befindet sich nur ein einzelnes vF auf der Strecke, so wird beim Halten des vernetzten Fahrzeuges die Distanz zwischen ihm und der Haltelinie bestimmt (Distanz 1, Zeit = 0 s, Abb. 15). Bei zwei oder mehr als zwei vernetzten Fahrzeugen berechnet sich die Distanz jeweils zwischen dem letzten stromaufwärts haltenden vF (Distanz 2, Zeit = 30 s, Abb. 15 oder Distanz 3, Zeit = 60 s, Abb. 15) und dem letzten für das Verfahren herangezogene vernetzte Fahrzeug.

In Abbildung 15 ist das für das Verfahren letzte herangezogene Fahrzeuge Car 2 Zeit = 30 s. Bei der Bestimmung der Entfernung zwischen den zwei Fahrzeugen wird nur das am weitesten stromaufwärts liegende vF (z.B. Car 2, Zeit 30 s, Abb. 15) überprüft, ob es steht. Von dem anderen vF (Car 1, Zeit 30 s, Abb. 15) wird die Distanz abgerufen, auch wenn es in Bewegung ist. Dies wird deshalb so gewählt, da Ankunft 3 auch für vorfahrtsregelte Knotenpunkte verwendet wird und hier die Fahrzeuge kontinuierlicher über die Zeit abfließen. Durch ein Blocken/Verhindern einer Bestimmung auf Grund von Bewegungen eines vernetzten Fahrzeuges, wird die Bestimmung oft verhindert. Passiert ein vernetztes Fahrzeug ohne Halt die Strecke, wird dieses vernetzte Fahrzeug auch gewertet. Die standardisierte Fahrzeuglänge und der Mindestabstand werden auf die zu bestimmende Entfernung im Intervall (oder LSA Umlaufzeit) aufaddiert. Nicht vernetzte Fahrzeuge, die ohne Halt die Strecke passieren, werden nicht detektiert. Die innerhalb von 60 Sekunden (oder Umlaufzeit) erhobenen Entfernungen werden jeweils addiert. Nun wird von den letzten drei Messintervallen der Mittelwert gebildet. Auf Basis der addierten Strecken wird die aktuelle Verkehrsnachfrage bestimmt und hochgerechnet (in Kfz/h).

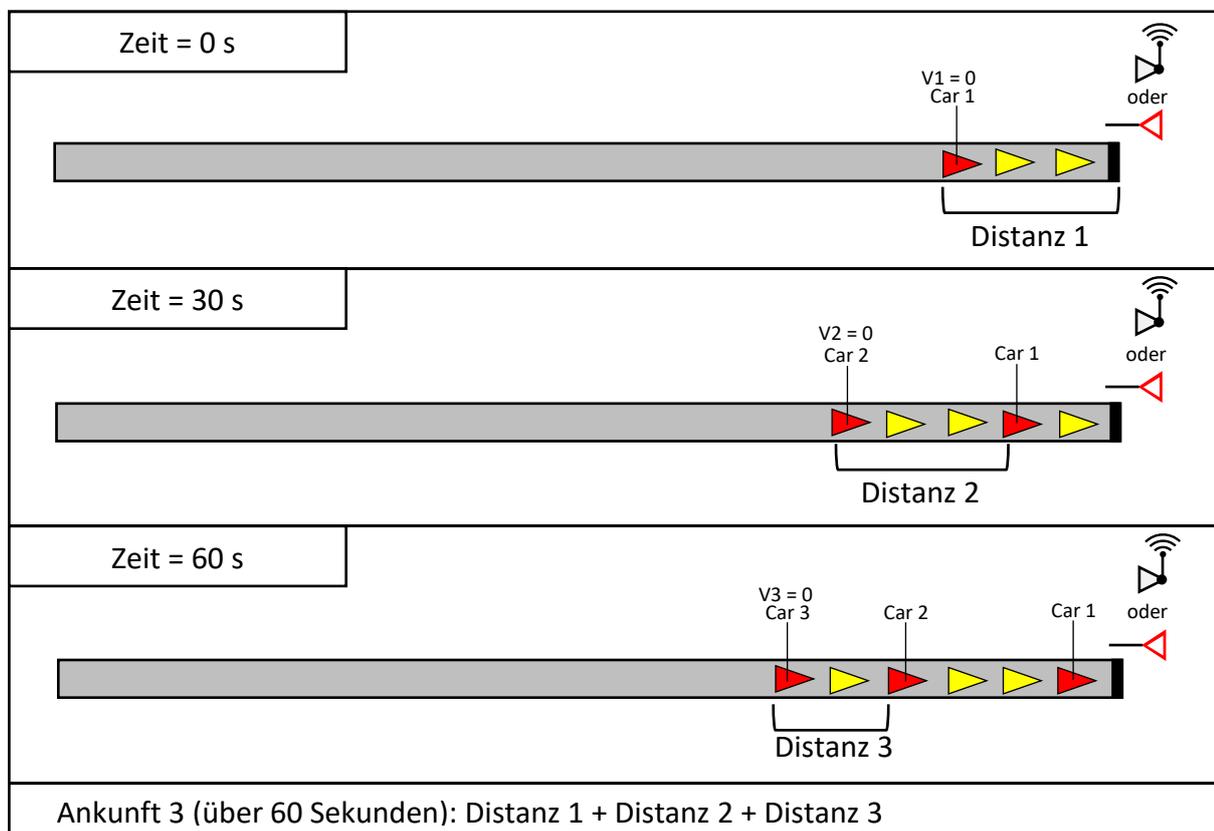


Abbildung 15: Ankunft 3

6.2.5 Reisezeitprognose

Dies ist eine Prognose über die Reisezeit, die ein Fahrzeug voraussichtlich bei einem gleichbleibenden Abfluss benötigt, um eine Strecke zu passieren. Diese Prognose wird über die maximale Staulänge (Kapitel 6.2.1), dem Abfluss (Kapitel 6.2.3) sowie der LSA-Umlaufzeit bestimmt. Der Zeitpunkt der Ankunft eines Fahrzeuges im Signalzeitenprogramm findet ebenfalls Berücksichtigung. Folgende Formel ergibt sich:

Prognose Reisezeit: (Max. Staulänge/Abfluss) * Umlaufzeit + Zuschlag = Reisezeitprognose

Zuschlag: Ankunftszeitpunkt eines vernetzten Fahrzeuges zur aktuellen Umlaufsekunde des LSA-Programms sowie fester Wert für die Zeit der Kreuzungsüberfahrt

Die Reisezeitprognose dient als Werkzeug für den Funktionsnachweis der maximalen Staulängenbestimmung. Sie wird sozusagen als Kontrollverfahren genutzt.

6.2.6 Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar - mit LSA

Auf einer Strecke mit LSA wird die Anzahl der Fahrzeuge mithilfe von vernetzten Fahrzeugen bestimmt. Hier finden zwei unterschiedliche Methoden Verwendung. **Fahrzeuganzahl 1** bestimmt die Anzahl der Fahrzeuge in einer Aufstauung vor einer LSA. Die zweite Methode **Fahrzeuganzahl 2** bestimmt die sich bewegenden Fahrzeuge auf der freien Strecke mittels fahrzeugseitigem Radar. (Abbildung 16)

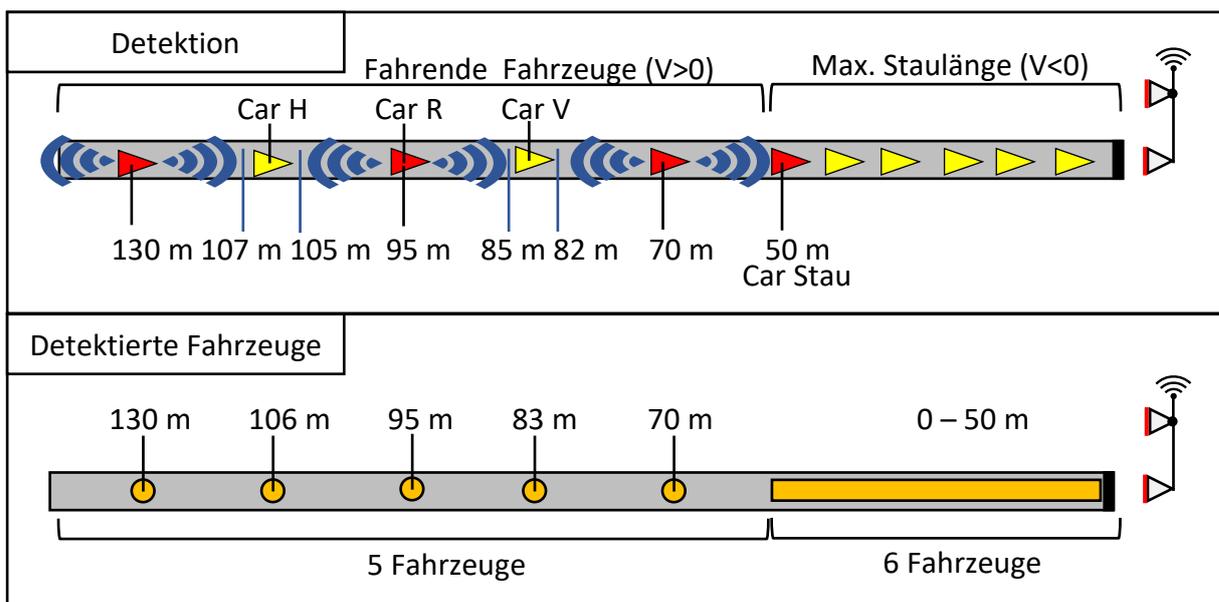


Abbildung 16: Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar - mit LSA

Fahrzeuganzahl 1: Bestimmung der Anzahl von Fahrzeugen in einer Aufstauung - mit LSA

Hierbei findet die Bestimmung der maximalen Staulänge vor einer LSA aus Kapitel 6.2.1 Verwendung. Mithilfe der Aufstauung in Metern kann die Anzahl der Fahrzeuge berechnet/geschätzt werden, die sich vor einer Lichtsignalanlage in einer Aufstauung befinden (Detektion, max. Staulänge, Abb. 16).

Fahrzeuganzahl 2: Bestimmung der Anzahl von Fahrzeugen auf der freien Strecke

Zur Bestimmung der Anzahl von Fahrzeugen auf der freien Strecke wird die fahrzeugseitige Sensorik von vernetzten Fahrzeugen genutzt. Ein vernetztes Fahrzeug wird als Moving Observer (Kapitel 3.4.2) verwendet. Das heißt, das vernetzte Fahrzeug ist zusätzlich mit der Funktion ausgestattet, seine Umgebung mittels Radar zu beobachten.

Hierfür wird das Front- und Heckradar sämtlicher vernetzter Fahrzeuge genutzt. Die Datenverarbeitung eines vF erfolgt nur, wenn sich das vF stromaufwärts des für die maximale Staulänge herangezogene Fahrzeug Car Stau befindet. (Detektion, Car Stau, Abb. 16) Das vernetzte Fahrzeug bestimmt seine eigene Position auf der Strecke (z.B. Car R, Detektion, Abb. 16). Erfolgt nun eine Detektion mittels Radar für Car H und Car V (Abb. 16), wird deren Position auf der Strecke über das bestimmende vF (Car R, Abb. 16) festgestellt. Informationen über die eigene Position und die mittels Radar detektierten Fahrzeuge werden an den Rechner gesendet. Auf Grund der übermittelten Positionen ist ersichtlich, wie viele Fahrzeuge sich auf einer Strecke befinden. Erscheinen Positionen von Fahrzeugen in einem gewissen Spielraum z.B. +/- fünf Meter doppelt, wird das als ein Fahrzeug gewertet. Dies ermöglicht ebenfalls eine Detektion von nicht vernetzten Fahrzeugen, welche sich auf der freien Strecke bewegen. In der Simulation wird das Radar vereinfacht nachgebildet, sodass jedes vF seinen Vorder- und Hintermann detektieren kann. Das Verfahren ist in Abbildung 16 dargestellt. Für das Radar eines vernetzten Fahrzeuges werden keine Fehldetektionen oder Störeffekte angenommen.

Unter Anwendung des plus/minus fünf Meter-Spielraumes werden längere Fahrzeuge, wie z.B. LKWs, ggfs. als zwei einzelne Fahrzeuge detektiert, was sich jedoch nicht negativ auf die Einschätzung der verkehrlichen Belastung auf einer Strecke auswirkt. Im Gegenteil, eine zweifache Zählung wäre sogar vorteilhaft, da längere Fahrzeuge in der Infrastruktur mehr Platz und Zeit beanspruchen.

Zusammenwirken der Fahrzeuganzahl 1 und Fahrzeuganzahl 2 - mit LSA

Beide Methoden (Fahrzeuganzahl 1 und Fahrzeuganzahl 2) bestimmen die Anzahl von Fahrzeugen auf einer Strecke. Dazu zählen Fahrzeuge, die in einer Aufstauung stehen, sowohl die sich bewegende Fahrzeuge auf der Strecke. Die Werte der beiden Methoden (Fahrzeuganzahl 1 und Fahrzeuganzahl 2) werden aufaddiert. Für fahrende Fahrzeuge kann durchgängig eine Fahrzeuganzahl bestimmt werden. Im vorliegenden Szenario werden die Sensordaten eines vernetzten Fahrzeuges nur verarbeitet bzw. benutzt, wenn es sich stromaufwärts hinter dem Fahrzeug der maximalen Staulänge (Detektion, Car Stau, Abb. 16) befindet. Die Maximale Staulänge wird immer nur zu festen Zeitpunkten bestimmt (Kapitel 6.2.1). Eine durchgängige Erhebung der Anzahl an Fahrzeugen würde zu häufigen Fehlbestimmungen führen. Vorherige Staulängen würden mit berechnet werden. Infolgedessen würden Fahrzeuge mit erhoben werden, die schon längst abgeflossen sind. Eine Bestimmung über die Anzahl von Fahrzeugen auf einer Strecke erfolgt nur zum Zeitpunkt der aktuellen Feststellung der maximalen Staulänge. Somit wird sichergestellt, dass alle Fahrzeuge in einer Auffstauung vor der LSA zum Zeitpunkt der Bestimmung halten und noch vorhanden sind.

6.2.7 Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar - ohne LSA

Mithilfe von vernetzten Fahrzeugen wird die Anzahl an Fahrzeugen bestimmt, die sich auf einer Strecke befinden, welche auf einen vorfahrtsregulierten Knotenpunkt trifft. Zwei verschiedene Methoden werden hierbei angewandt. **Fahrzeuganzahl 3** bestimmt die Anzahl der Fahrzeuge, die sich in der Aufstauung vor der Einmündung/Kreuzung befinden. **Fahrzeuganzahl 2** ist für die Bestimmung der fahrenden Fahrzeuge auf freier Strecke mittels fahrzeugseitigem Radar der vernetzten Fahrzeuge zuständig.

Fahrzeuganzahl 3: Bestimmung der Anzahl von Fahrzeugen in einer Aufstauung - ohne LSA

Das am weitesten stromaufwärts haltende vernetzte Fahrzeug ($V < \text{Staugeschwindigkeit}$) wird für die Staulängenbestimmung herangezogen. Es können nur Daten von Car Stau (Abb. 9) oder Daten von vF (Car 2, Car 3, Abb. 9), die sich stromaufwärts hinter Car Stau befinden, für eine erneute Staulängenbestimmung verarbeitet werden. Für eine Strecke ohne LSA existiert kein Mechanismus um fehlerhafte Bestimmungen der maximalen Staulänge zu verhindern. Lücken wie in Abbildung 11 beschreiben, können also mitdetektiert werden. An einem vorfahrtsregulierten Knotenpunkt sind Fahrzeuge stetig zum Aufrücken in Bewegung. Eine gewisse Fehlertoleranz in Bezug auf die Staulänge muss hier akzeptiert werden.

Fahrzeuganzahl 2: Bestimmung der Anzahl an Fahrzeug auf der freien Strecke

Ein identischer Ablauf wie Fahrzeuganzahl 2 aus Kapitel in 6.2.6.

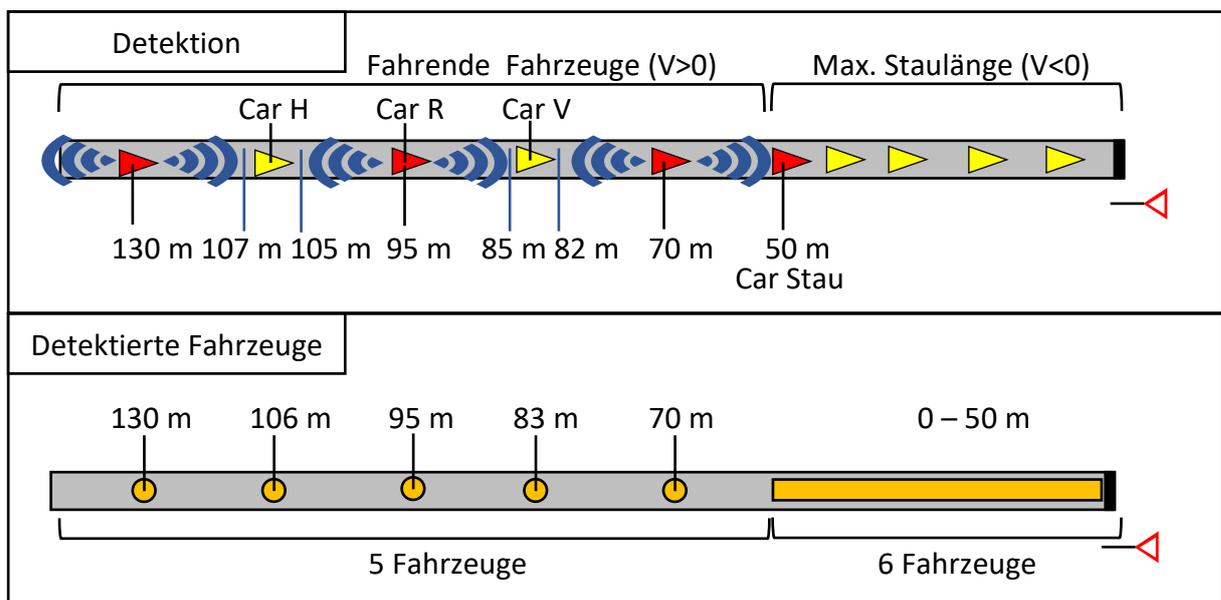


Abbildung 17: Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar - ohne LSA:

Zusammenwirken der Fahrzeuganzahl 2 und Fahrzeuganzahl 3 - ohne LSA

Die zwei Werte der oben beschriebenen Methoden werden addiert, um alle Fahrzeuge der Strecke ohne LSA bestimmen zu können. Kann eine aktuelle Staulänge bestimmt werden, so wird auch die Anzahl an Fahrzeugen auf der Strecke ermittelt. Eine Verarbeitung von historischen Werten wird somit verhindert.

6.3 VERFAHREN FÜR INDUKTIONSSCHLEIFEN

Abflussrate pro Freigabe - Induktionsschleife

Während einer Freigabe wird mittels einer Induktionsschleife die Anzahl der passierenden Fahrzeuge erhoben. Erfolgt eine Belegung der Induktionsschleife gefolgt von einer Nichtbelegung, so wird das als ein Fahrzeug gewertet. Fahrzeuge, die die Induktionsschleife passieren, werden somit gezählt. Dieses Verfahren wird in der Praxis bereits unter Einsatz von Induktionsschleifen angewandt. In dem Forschungsprojekt „Verkehrsabhängige Intelligente Steuerung von Lichtsignalanlagen“ (VITAL) des DLRs wird mit vorhandener Infrastruktur (z.B. Induktionsschleifen) eine Verkehrsdatenerfassung umgesetzt, um Einfluss auf den Verkehrsablauf nehmen zu können und diesen zu optimieren [VITAL].

Beim Einsatz von Staudetektoren wäre zu beachten, dass bei geringen Aufstauungen primär die ankommenden Fahrzeuge erhoben werden. Eine Detektion der abfließenden Fahrzeuge wäre erst bei einer über den Staudetektor hinausgehenden Aufstauung sinnvoll. Das Zählen von Fahrzeugen, die eine Kante verlassen, könnte über Anforderungsschleifen geschehen. (Lage Induktionsschleifen, Abb. 2)

Detektieren eines nicht vollkommenen Abflusses - Induktionsschleife

Wird während der Freigabe über einen längeren Zeitraum kein Fahrzeug gezählt oder ist die Induktionsschleife nach Freigabende nicht mehr belegt, so wird angenommen, dass alle Fahrzeuge während der Freigabe der LSA abgeflossen sind.

Staudetektion - Induktionsschleife

Mittels Staudetektoren ist lediglich eine diskrete Staulängenerfassung für eine bestimmte Staulänge möglich, da die Induktionsschleife stationär ist.

Hält sich z.B. ein Fahrzeug länger als fünf Sekunden (Schwellwert) über einer Induktionsschleife auf, kann dieses als Stau gewertet werden. Somit wird bei sehr langen langsam fahrenden Fahrzeugen nicht direkt auf Stau geschlossen. [FGSV RiLSA] (S.41)

Induktionsschleifen - vernetzte Fahrzeuge

Daten von Induktionsschleifen eignen sich recht gut als Ergänzung zu den Informationen von vernetzten Fahrzeugen. So liefern sie Daten von Strecken, auf denen sich z.B. keine vernetzten Fahrzeuge bewegen/befinden. Eine Vernetzung der Induktionsschleife über die Vernetzung der jeweiligen LSA ist denkbar. Da die Steuergeräte der LSA in der Lage sind, Daten ihrer Induktionsschleifen abzufragen und zur Verfügung zu stellen.

7 GENERISCHES NETZ

7.1 SIMULATIONSSZENARIEN - GENERISCHES NETZ

7.1.1 Anzahl an Simulationen und Startzufallszahlen

Alle Simulationsszenarien werden jeweils mit $n = 10$ Simulationsläufe mit 10 verschiedenen Startzufallszahlen durchgeführt. Als erste Startzufallszahl wird die Zahl 12 gewählt und jede weitere Startzufallszahl wird um 12 erhöht ($n = 10$ Simulationen) Daher sind alle Ergebnisse der Auswertung, Werte der jeweiligen 10 Simulationsläufe. Werden Simulationen einer einzelnen Startzufallszahl betrachtet, wird dieses explizit aufgeführt.

7.1.2 Verkehrsbelastung - generisches Netz

Die Verkehrsbelastung Q1 wird über eine Simulationszeit von 3600 s definiert unter Einspeisung von 310 Fahrzeugen. Die Anzahl an Fahrzeugen (kfz/h) variiert zur entsprechenden Simulationszeit wie in Abbildung 18 dargestellt. Gewisse Schwankungen in der Nachfrage ergeben sich aus unterschiedlichen Startzufallszahlen und der random-departure-offset Einstellung in SUMO. Die tatsächliche Verkehrsbelastung der in einem Umlauf oder 60 s Intervall ankommenden Fahrzeuge wird für die beiden Simulationsszenarien mit und ohne LSA erhoben, um einen Vergleich der erfassten Werte der Verfahren mit der realen Verkehrsbelastung zu ermöglichen. Abbildung 19 stellt die Verkehrsbelastung QT1 (pro Umlauf) für das Simulationsszenario der Strecke mit LSA dar. Abbildung 20 stellt die Verkehrsbelastung QT1.2 (pro 60 s - Intervall) für das Simulationsszenario mit einem vorfahrtsregulierten Knotenpunkt dar.

Abbildung 18: Verkehrsbelastung Q1

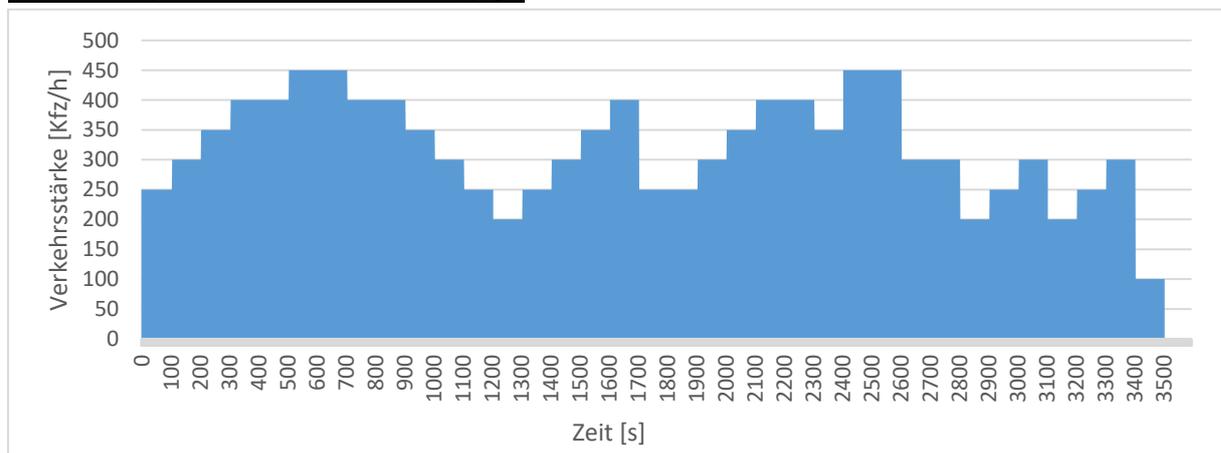
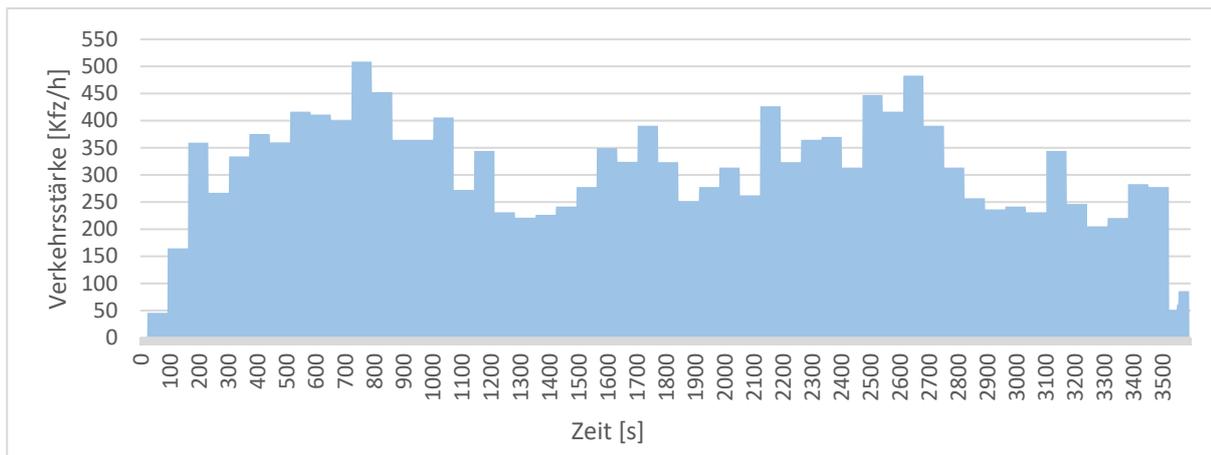
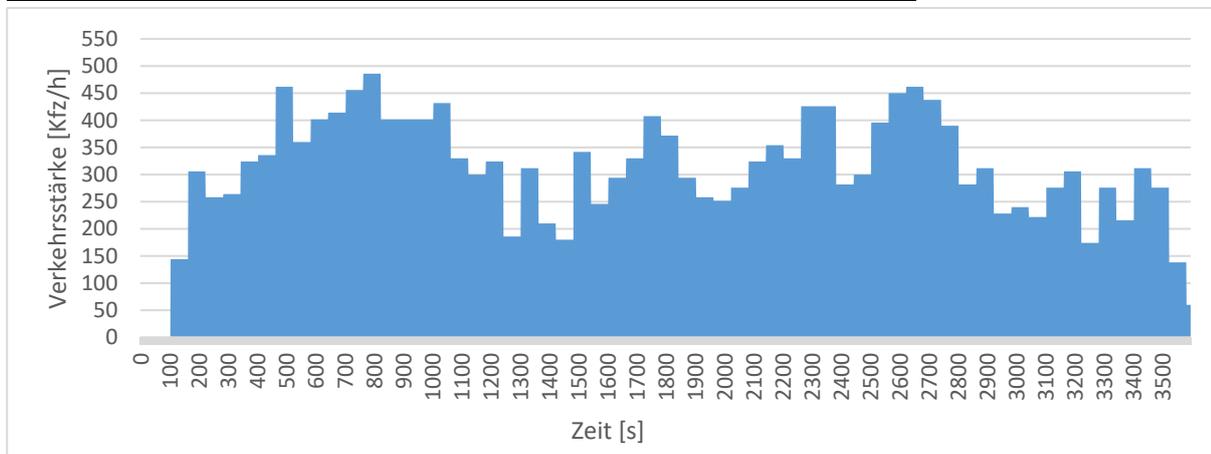


Abbildung 19: Tatsächliche Verkehrsbelastung QT1 (mit LSA)**Abbildung 20: Tatsächliche Verkehrsbelastung QT1.2 (ohne LSA)**

Die Verkehrsbelastung in den Simulationsszenarien basiert auf unterschiedlichen Ausstattungsraten von vernetzten Fahrzeugen. Der Prozentsatz gibt jeweils den Anteil der vernetzten Fahrzeuge in Bezug auf den gesamten Verkehr (hier 310 Fahrzeuge bei Q1) an.

Bedeutet:

100 AvF = 100prozentige Ausstattungsrate an vernetzten Fahrzeugen

15 AvF = 15prozentige Ausstattungsrate an vernetzten Fahrzeugen

Die tatsächliche prozentuale Ausstattungsrate an vernetzten Fahrzeugen (AvF) weist nur minimale Abweichungen zu den ausgesuchten Prozentsätzen (100 %, 75 %, 50 %, 25 %, 15 %) auf (Tabelle1: AvF). Die hinteren Kommastellen werden jeweils ab- bzw. aufgerundet, da in der Realität nur ganze bzw. diskrete Fahrzeuge existieren.

Tabelle 1: AvF

AvF (gerundet)	100 %	75 %	50 %	25 %	15 %
Reale AVF	100 %	74,3 %	50,3 %	25,7 %	14,8 %

7.1.3 Simulationsszenario - Strecke mit LSA

Das Testszenario (Abbildung 21) besteht aus einer Strecke (Länge: 600 m), mit einem Fahrstreifen, welche am Ende auf einen Knotenpunkt mit einer LSA trifft. Das Signalzeitenprogramm der LSA hat eine Umlaufzeit von $TU = 70$ s mit einer Festzeitsteuerung und weist eine Freigabezeit für den zu untersuchenden Fahrstreifen (UF, Abb. 21) von 20 s auf. Weitere Verkehrsströme müssen beim Queren des Knotenpunktes nicht beachtet werden. Dementsprechend erhält man eine konstante Anzahl an abfließenden Fahrzeugen bei jeder Freigabe. Die Verkehrsbelastung QT1 variiert zur entsprechenden Simulationszeit wie in Abbildung 19 aufgezeigt. Es werden unterschiedlich lange Aufstauungen von Fahrzeugen vor der LSA initiiert. Unter Anwendung verschiedener AvF (von 100 % bis 15 %) werden nun folgende Methoden untersucht.

- Bestimmung der maximalen Staulänge
- Abfluss
- Ankunft 1
- Ankunft 2
- Ankunft 3
- Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar

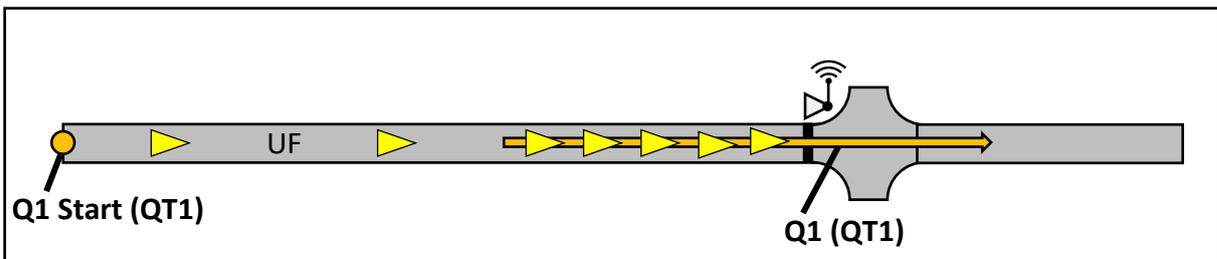


Abbildung 21: Simulationsszenario - Strecke mit LSA

7.1.4 Simulationsszenario - Strecke ohne LSA

Das Testszenario besteht aus einer 600 Meter langen Strecke mit einem Fahrstreifen. Auf dieser Strecke werden die Verfahren **maximale Staulänge**, **Ankunft 3** und **Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar** angewandt. Die zu untersuchende Fahrbahn (UF, Abb. 22) trifft auf einen vierarmigen Knotenpunkt. Als Verkehrsbelastung auf UF dient die Belastung aus QT1.2 Abbildung 20. In Gegenrichtung passiert ein Verkehrsstrom Q2 (geradeaus) mit der Verkehrsstärke von 400 Kfz/h den Knotenpunkt. Die Linksabbieger von UF müssen also dem Verkehrsstrom Q2 Vorfahrt gewähren. Eine Aufstauung auf UF wird hervorgerufen, indem jegliche Fahrzeuge am Knotenpunkt links abbiegen und somit UF verlassen. Die bereits aufgezählten Verfahren werden nun untersucht und angewandt.

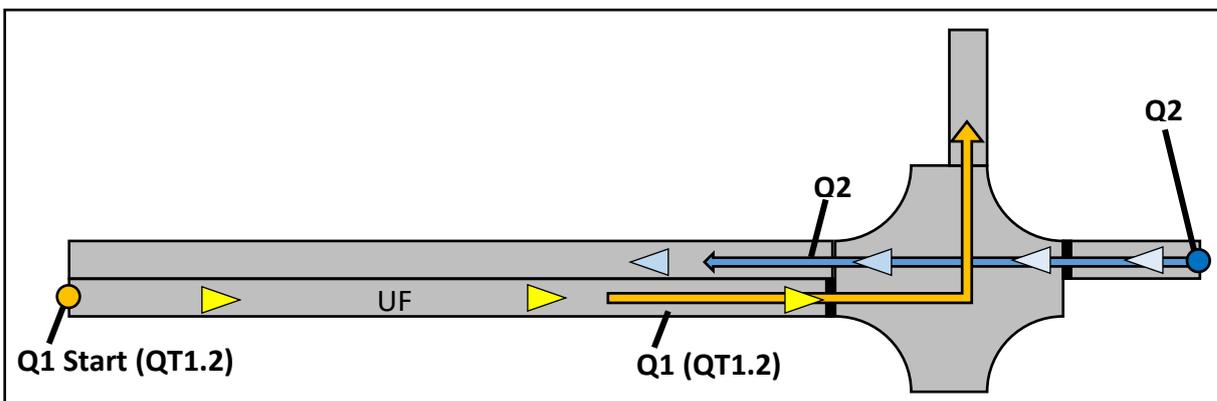


Abbildung 22: Simulationsszenario - Strecke ohne LSA (vorfahrtsgeregelt)

7.2 AUSWERTUNG - STRECKE MIT LSA

7.2.1 Staulänge und Reisezeitprognose

Ein Stau definiert sich über den bestimmten Zustand, den mehrere Fahrzeuge gleichzeitig aufweisen (z.B. Stehen). Fahrzeuge werden hier als im Stau befindlich definiert, wenn keines von ihnen die Geschwindigkeit von 0,2 m/s überschreitet. Mittels der Reisezeitprognose erfolgt der Funktionsnachweis des Verfahrens der maximalen Staulänge. Die Reisezeitprognose wird, wie in Kapitel 6.2.5 beschrieben, auf der Basis der maximalen Staulänge und der abfließenden Fahrzeuge getroffen. Sie wird als Referenzwert im Vergleich zu den erhobenen Staulängen unter Berücksichtigung der verschiedenen AvF herangezogen. Für die Reisezeitprognose ist in diesem Nachweis der Abfluss an Fahrzeugen pro Freigabe und Umlauf identisch. Lediglich die erhobene maximale Staulänge wirkt sich variabel auf die Prognose aus. Mittels Gegenüberstellung von Reisezeitprognose und tatsächlicher Reisezeit ist die Funktion der maximalen Staulänge überprüfbar. Nach erfolgtem Nachweis wird die erhobene Staulänge unter einer 100 AvF als Referenzwert betrachtet und mit den erhobenen Staulängen mittels geringerer AvF verglichen

Funktionsnachweis der Staulängenbestimmung mittels der Reisezeitprognose

Zum Funktionsnachweis der Staulängenbestimmung wird die Reisezeitprognose im Vergleich zur Reisezeit herangezogen. Gewertet wird jeweils die Strecke zwischen dem Erreichen des Stauendes (Start, Abb. 23) bis zum erfolgreichen Überqueren des Knotenpunktes (Ende, Abb. 23) mittels vernetzter Fahrzeuge. Die Prognose erfolgt bei einer 100prozentigen Ausstattungsrate von vernetzten Fahrzeugen. Abbildung 24 zeigt die Abweichung/Differenz zwischen der Reisezeitprognose und realer Reisezeit der Fahrzeuge auf Grundlage der Veränderung der maximalen Staulänge. Hier sind alle Messwerte und Abweichungen der 10 Simulationen mit 10 verschiedenen Startzufallszahlen gleichzeitig dargestellt.

Die Zeit zwischen Freigabeende und erneuter Freigabe beträgt 55 s. Weicht die errechnete Reisezeit nur um 1 s von der tatsächlichen Reisezeit ab, hat dies Auswirkungen bezüglich der Berechnung über die Anzahl der Umläufe, die ein Fahrzeug zu warten hat. Ein Umlauf mehr oder weniger bedeutet eine Abweichung von 55 s (mehr oder weniger) für die Reisezeitprognose. Abbildung 24 stellt dieses dar. Hier sind auch einzelne Abweichungen zwischen -20 s und -30 s zu erkennen, diese werden jedoch vernachlässigt und nicht weiter betrachtet, da die Reisezeitprognose nur als Kontrollmechanismus dient. Eine Ausarbeitung eines Reisezeitprognoseverfahrens steht für diese Arbeit nicht im Fokus. Abbildung 25 stellt die prozentualen Anteile aller Abweichungen dar. Hier ist gut zu erkennen, dass 90 % der Prognosewerte höchstens eine Abweichung von 7 s aufweisen.

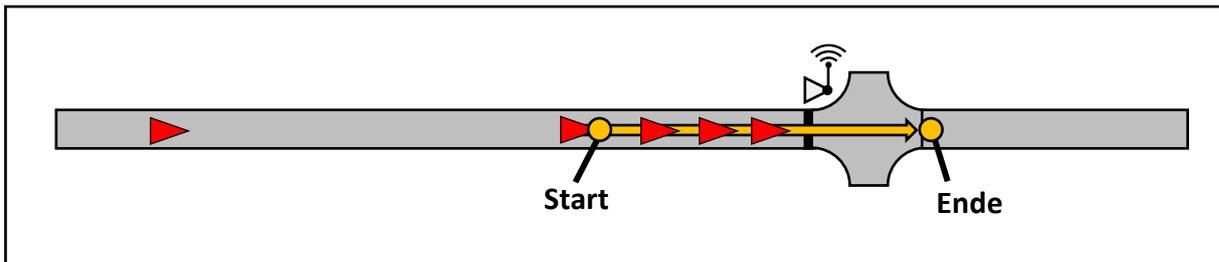


Abbildung 23: Reisezeiterhebung

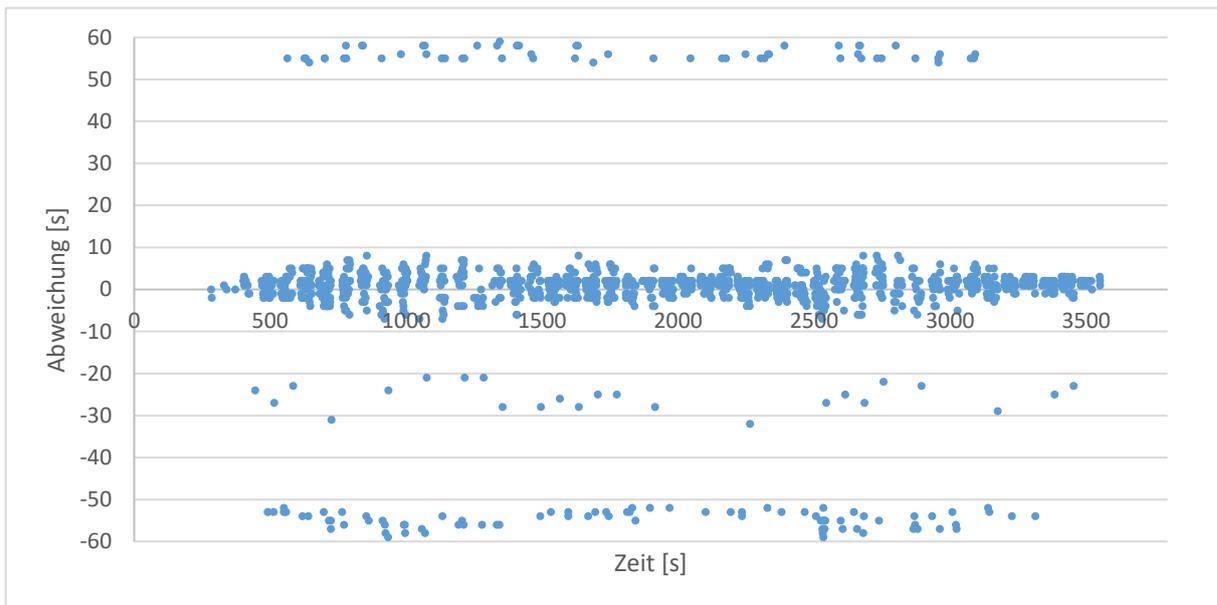


Abbildung 24: Abweichung der Reisezeitprognose

Abbildung 26 zeigt Werte einer einzelnen Simulation (Startzufallszahl 12 mit 100 AvF). Grau stellt die Reisezeit für das Passieren der gesamten Strecke dar. Die blauen Datenpunkte zeigen die Abweichung der Reisezeit in Sekunden (Differenz: Reisezeitprognose - Reisezeit) von vernetzten Fahrzeugen an, die für die Prognose herangezogen werden. Parallel dazu wird die Verkehrsbelastung in Grün dargestellt.

Zu erkennen ist, dass sich die Prognose auch bei einer Nachfragenänderung stabil darstellt. Eine steigende Nachfrage hat eine leichte Erhöhung der Abweichung zur Folge. Bei 800 s-1500 s und 2700 s - 3000 s ist der Wert der Reisezeit relativ hoch, bedingt durch die erhöhte Aufstauung vor der LSA. Die Verhinderung der Stauwellendetektion (Kapitel 6.2.1) führt zu einer geringeren Anzahl von Prognosewerten. Prognosen werden für einen längeren Zeitraum erstellt und führen zu leicht erhöhten Abweichungen in diesen Zeiträumen. Fehlermaße werden aufaddiert und führen zu einem größeren Fehler.

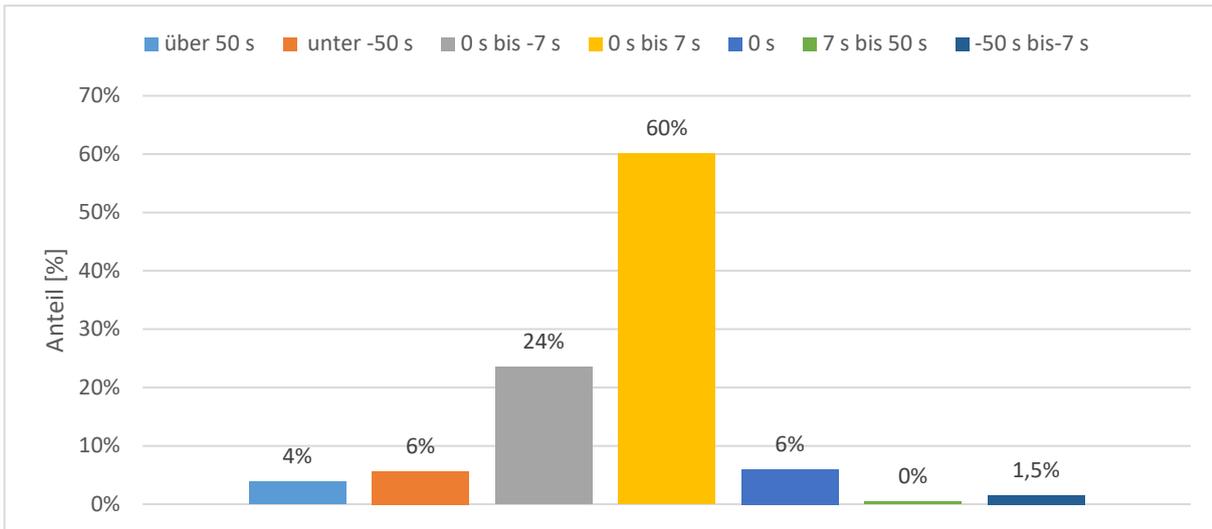


Abbildung 25: Prozentuale Aufteilung - Abweichung der Reisezeitprognose

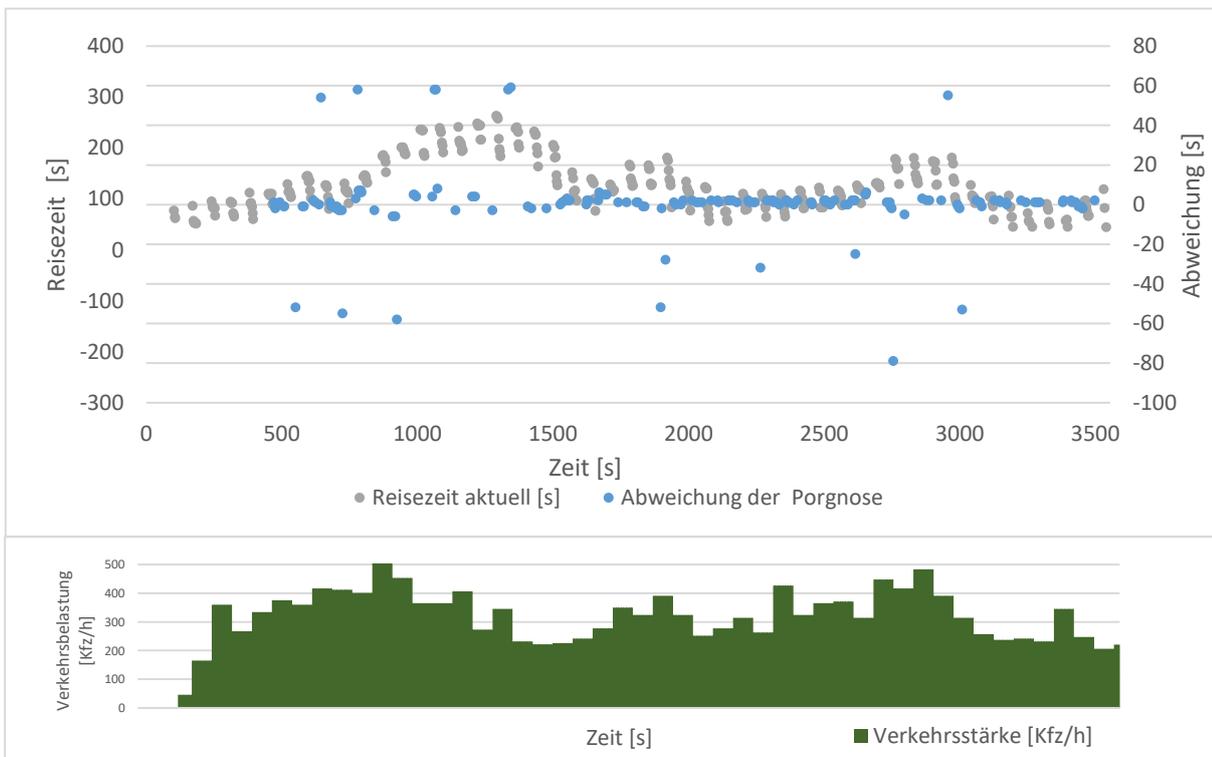


Abbildung 26: Abweichung Reisezeitprognose – Reisezeit (12, 100AvF)

In Abbildung 24 und Abbildung 25 ist gut zu erkennen, dass auf der Basis der maximalen Staulängenbestimmung eine Prognose der Reisezeit getroffen werden kann. Damit ist die Funktionstüchtigkeit der max. Staulängenbestimmung nachgewiesen. Die erfasste Staulänge bei einer 100prozentigen AvF kann als Referenzstaulänge definiert werden.

7.2.2 Auswertung der maximalen Staulängenbestimmung - mit LSA

Abbildung 27 stellt die ermittelten Staulängen bei verschiedenen Ausstattungsraten an vernetzten Fahrzeugen (100 %, 75 %, 50 %, 25 %, 15 %) dar. Die Staulänge, die mit einer 100 % AvF bestimmt wird, wird als reale Staulänge angesehen. Bei einer 100prozentigen Ausstattungsrate an vernetzten Fahrzeugen ist sichergestellt, dass die gesamten Fahrzeuge in der Aufstauung exakt ohne Fehlerquote erhoben werden. Deshalb gilt Referenzstaulänge = erfasste Staulänge mit 100 AvF. In Abbildung 27 ist zu erkennen, dass die maximale Staulänge mit sinkender AvF zunehmend unterschätzt wird.

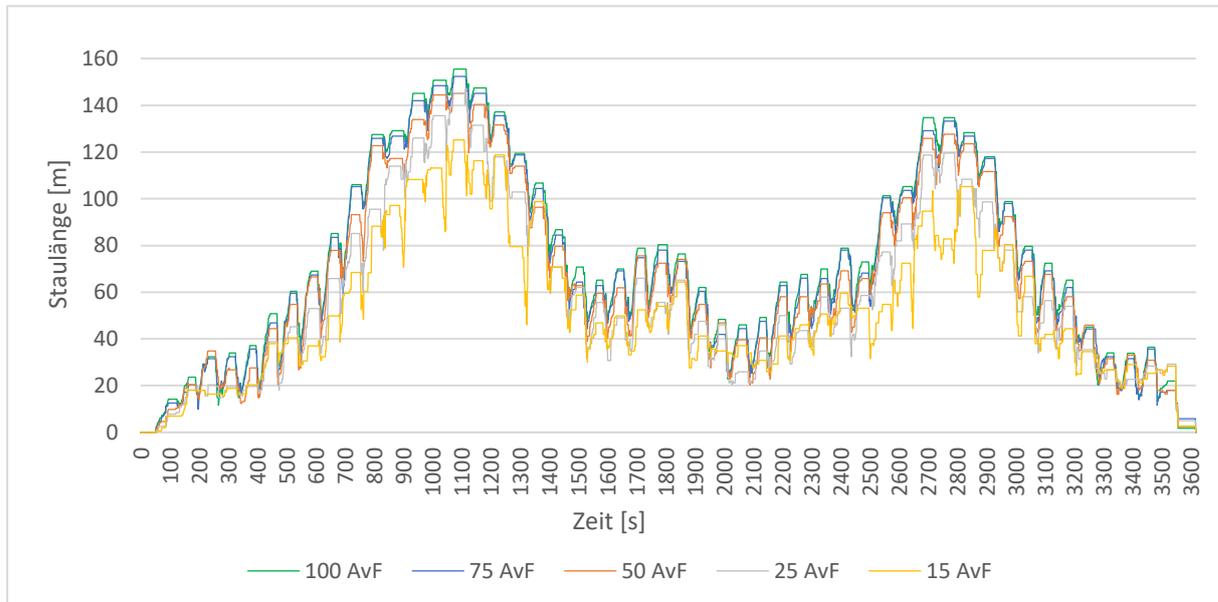


Abbildung 27: Max. Staulänge (100AvF bis 15AvF) – mit LSA

Abbildung 28 zeigt die Differenz (gemessen in Metern) zwischen der Referenzstaulänge 100AvF und den erhobenen Staulängen unter Verwendung niedrigerer Ausstattungsraten von vernetzten Fahrzeugen (75 AvF, 50 AvF, 25 AvF und 15 AvF). Der Mittelwert der gemessenen Staulänge (von $n = 10$ Simulationen) liegt bei einer Simulationszeit von einer Stunde bei 73 Metern sowie einer maximalen Staulänge von 155 Metern.

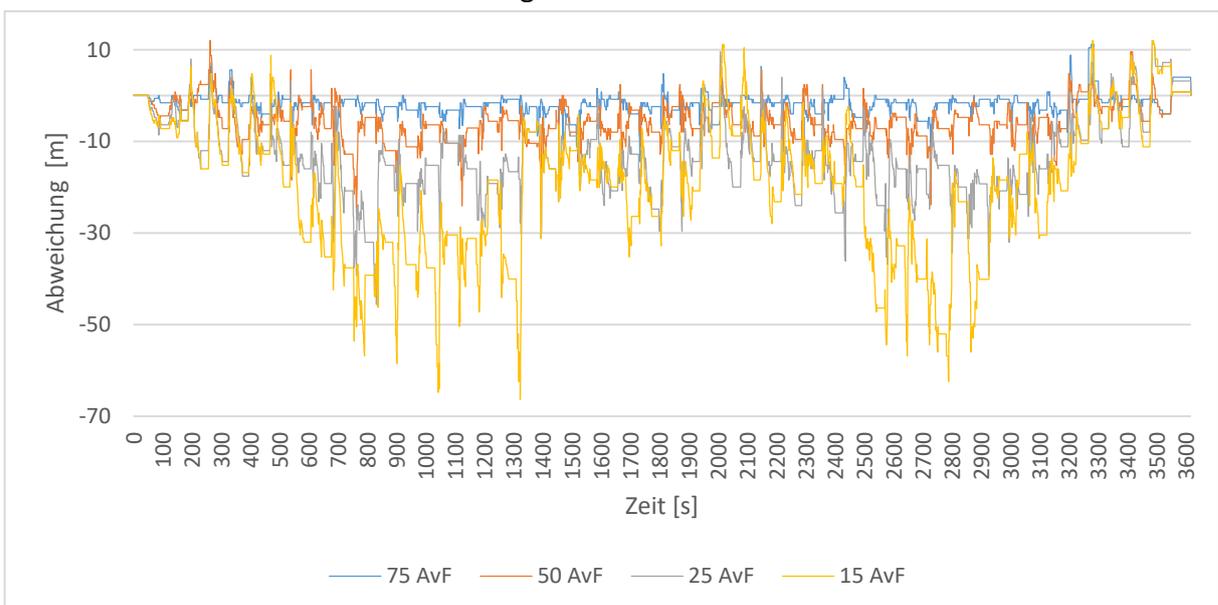
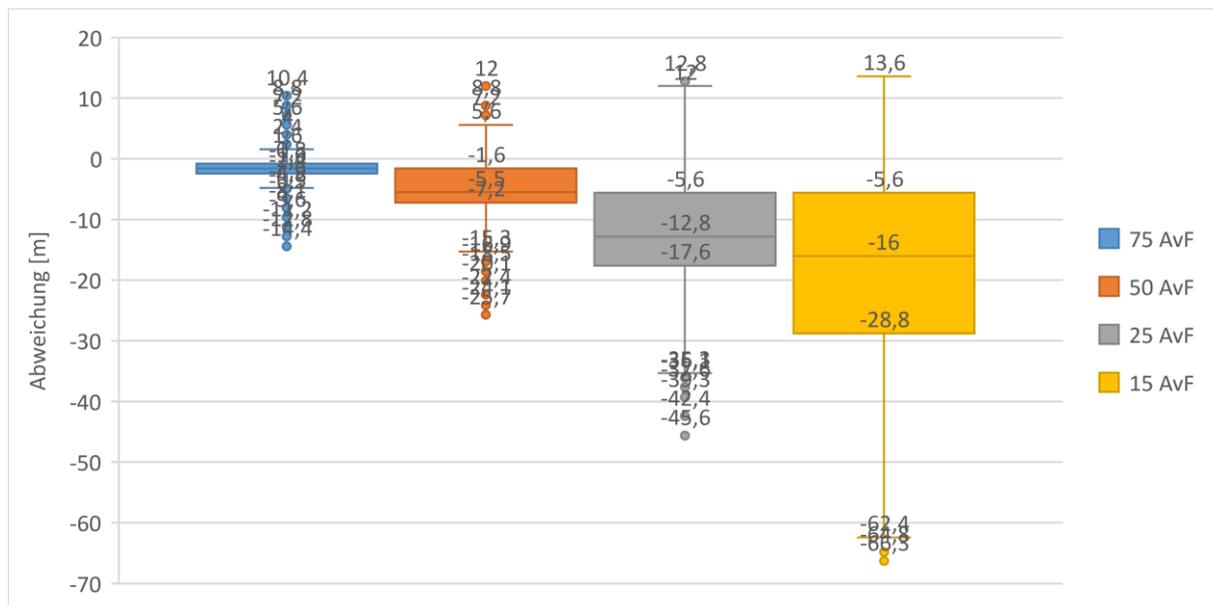


Abbildung 28: Abweichung der max. Staulänge - mit LSA

In Abbildung 29 ist die Abweichung der erhobenen Staulängen unter Anwendung verschiedener AvF zur der Referenzstaulänge (100 AvF) mithilfe von Boxplots dargestellt. Abbildung 30 zeigt die daraus resultierende Abweichung der erhobenen Anzahl an Fahrzeugen in der Aufstauung. Hier ist ebenfalls zu erkennen, dass mit sinkender AvF (75 AvF bis 15 AvF) die Staulänge zunehmend unterschätzt bestimmt wird und die Streuung der Abweichung steigt.

Ist das letzte Fahrzeug in der Aufstauung kein vernetztes Fahrzeug, führt dieses zur negativen Abweichung. Die leicht positiven Abweichungen der Staulänge, welche mit sinkender AvF leicht ansteigen, werden durch den Wegfall der Verhinderung der Staulwellendetektion (wie in Abbildung 6.2.1 beschrieben) hervorgerufen.



Stellt man die maximalen Abweichungen der Fahrzeuganzahl aus Abbildung 30 der Fahrzeuganzahl innerhalb der Staulänge aus Abbildung 31 gegenüber, so ist eine Abweichung von maximal drei Fahrzeugen bei einer 50prozentigem AvF noch akzeptabel. Abweichungen bis zu sechs Fahrzeugen bei einer 25prozentigen AvF sind hingegen grenzwertig (Abb. 30). Wenn man dabei berücksichtigt, dass im untersuchten Szenario ca. sechs Fahrzeuge pro Umlauf abfließen und bei einer maximalen Aufstauung von 20 Fahrzeugen (Abb. 31) bereits sechs Fahrzeuge 30 % der aufgestauten Fahrzeuge ergeben.

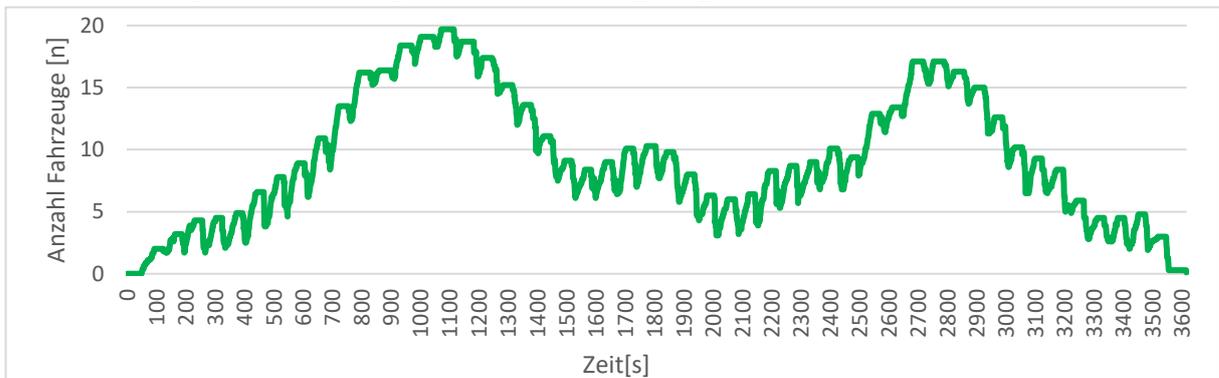


Abbildung 31: Anzahl an Fahrzeugen in der Staulänge

Verlauf der Staulängen einer einzelnen Simulation

Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigen die erhobenen Staulängen in Simulationen mit jeweils gleicher Startzufallszahl (12), jedoch unter Anwendung verschiedener AvF (von 100 AvF bis 15 AvF). Mit abnehmender AvF werden Detektionen seltener und es erfolgen immer größerer Sprünge innerhalb der erhobenen Werte. Die sinkende AvF hat auch eine geringere Auflösung bei der Darstellung der Staulänge zur Folge. Jedoch selbst bei der minimalen Ausstattungsrate von 15 AvF ist ein qualitativer Verlauf der Staulänge ablesbar.

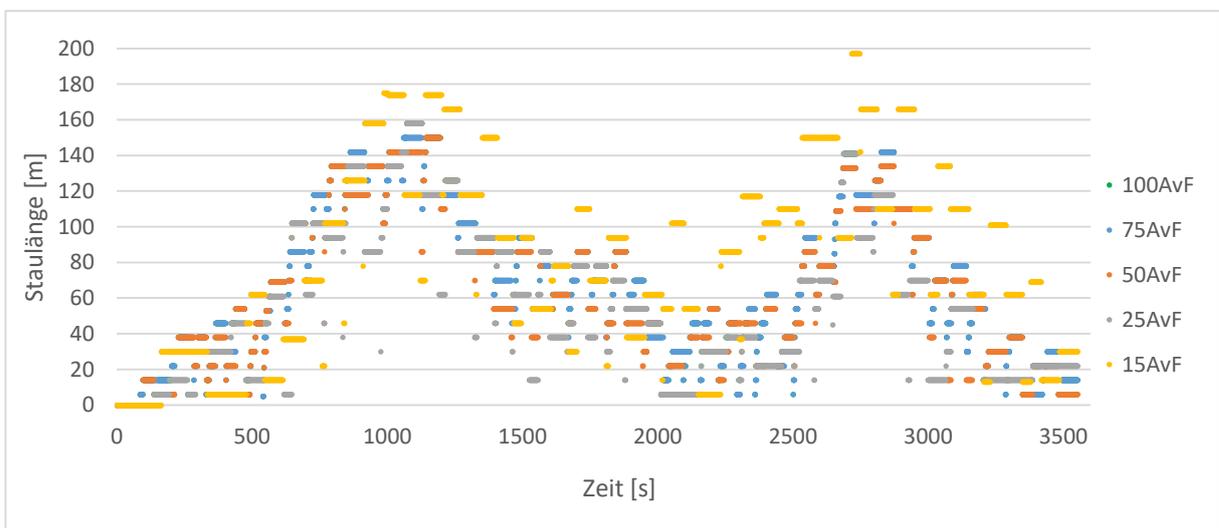


Abbildung 32: Staulänge von Simulationen unterschiedlicher AvF bei gleicher Startzufallszahl - gemeinsame Abbildung

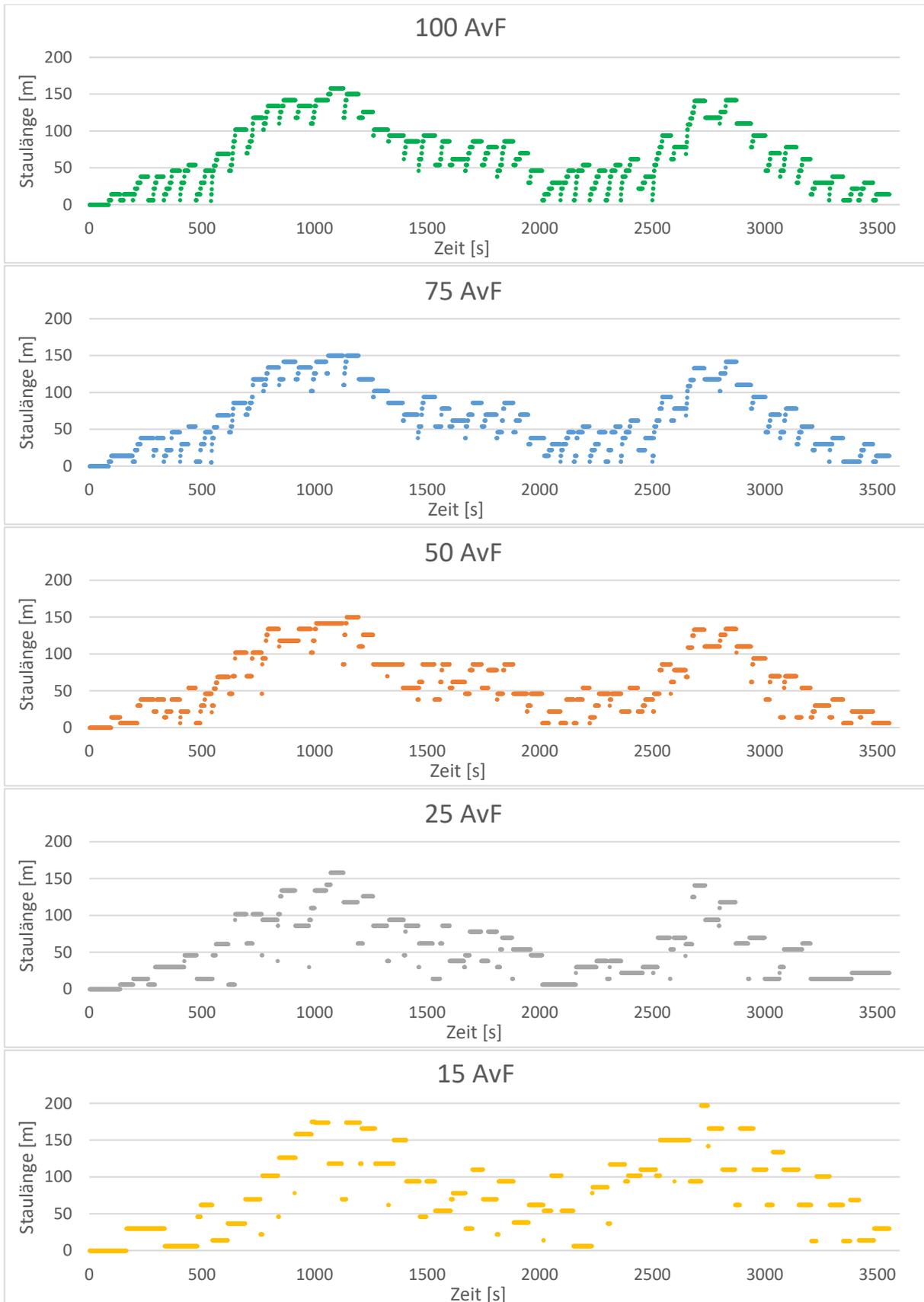


Abbildung 33: Staulänge von Simulationen unterschiedlicher AvF bei gleicher Startzufallszahl

Tabelle 2: Staulängen Update in [s]

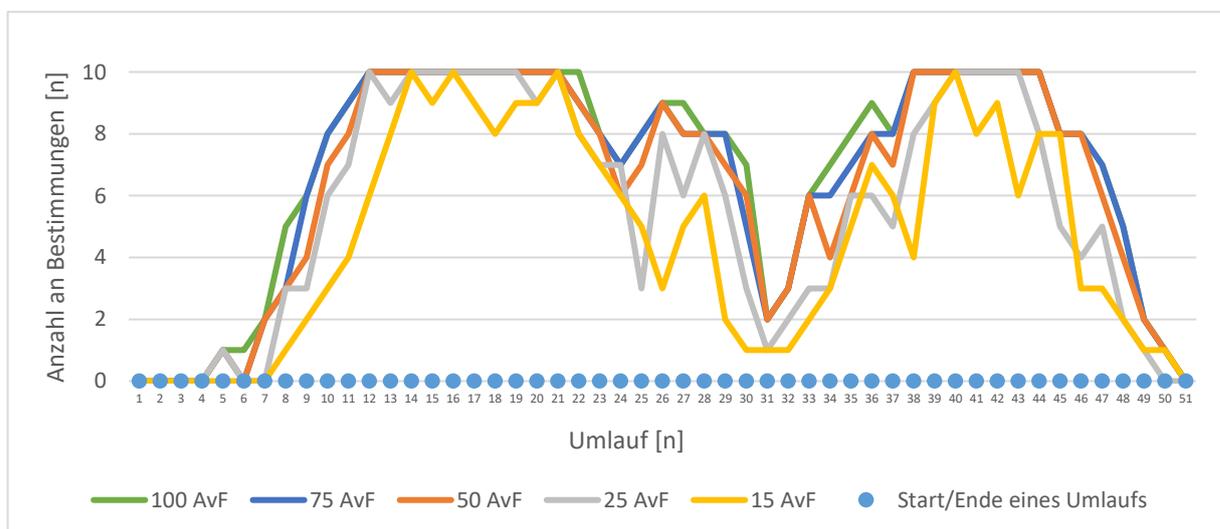
	100 AvF	75 AvF	50 AvF	25 AvF	15 AvF
Anzahl an Bestimmungen [n]	220,9	178,7	132,7	131,5	60,4
Bestimmungsintervall [s]	16,4 s	20,2 s	27,3 s	27,5 s	59,9 s

Tabelle 2 zeigt auf, wie häufig eine Bestimmung der Staulänge erfolgt ist (Mittelwert aller 10 Simulationen) und in welcher Frequenz (statistischer Wert in s) dies hochgerechnet geschehen ist. Der prozentuale Anteil von 100AvF ist hier etwas höher als bei den geringeren Ausstattungen, da durch das Aufrücken von Fahrzeugen ein einzelnes Fahrzeug mehrmals eine Staulängenbestimmung durchführen kann.

7.2.3 Auswertung des Verfahrens Abfluss - mit LSA

Soll ein Abfluss auf einer Strecke mit LSA bestimmt werden, muss sich ein vF mindestens zwei Umläufe vor der LSA befinden. Für jeden einzelnen Umlauf der Simulationszeit (3600 s) wird untersucht, ob es mindestens zu einer Abflussbestimmung pro Umlauf kommt. Abbildung 34 zeigt für jeden Umlauf, in wie vielen der insgesamt 10 Simulationen jeweils eine Abflussbestimmung erfolgt.

Bei einer 100prozentigen AvF kommt es ab der 840. Simulationssekunde in allen 10 Simulationen zu einer Abflussbestimmung. Bei allem was zeitlich davor liegt, ist entweder die Aufstauung vor der LSA zu gering, Fahrzeuge halten nur für einen Umlauf vor der LSA oder passieren ohne Halt die Haltelinie der LSA. Ab dem 13. Umlauf (der 910. s) kommt es erstmals in allen Simulationen (der verschiedenen AvF) zu einer Abflussdetektion. Es ist zu erkennen, dass hier die Verkehrsnachfrage einen größeren Einfluss auf die Abflussbestimmung als die Ausstattungsrate hat. Da von 100 AvF bis 25 AVF die Anzahl an Bestimmungen über die Veränderung der Verkehrsnachfrage ähnlich ist. Das heißt die Anzahl an Bestimmungen sinkt nur leicht mit sinkender AvF.

**Abbildung 34: Abflussbestimmung**

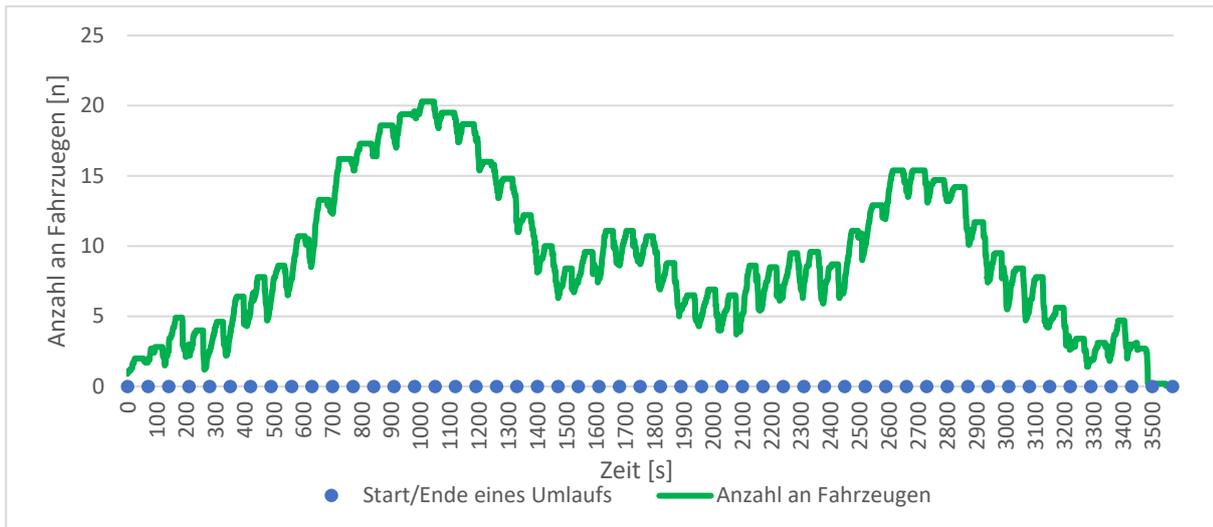


Abbildung 35: Anzahl an Fahrzeugen in der Staulänge

7.2.4 Vorgehensweise bei der Auswertung für die Ankunftsverfahren

Die Fahrzeuge werden für die Verkehrsnachfrage QT1 bei Start in Abbildung 21 eingespeist. In der Simulation wird für die Auswertung ebenfalls erhoben, wie viele Fahrzeuge tatsächlich pro Umlauf auf der Strecke eintreffen QT1 (Abb. 19). Zur Auswertung der Ankünfte, werden die bestimmten Werte der Ankunftsverfahren mit der vorliegenden Verkehrsbelastung verglichen. Die Ankunftsbestimmung findet jedoch erst später vor der Haltelinie der Einmündung/Kreuzung und über die Zeitspanne eines Umlaufes statt.

Daraus resultiert eine zeitliche Verschiebung der Nachfragekurve („Verzögerung“), um die Verkehrsnachfrage und die erhobenen Werte der Ankünfte miteinander vergleichen zu können. Die Erhebung von Ankunft 1, 2 und 3 erfolgt im identischen Intervall (70s von Beginn bis Ende der Rotzeit). Die Verschiebung ergibt sich aus der Reisezeit der 600 Meter langen Strecke bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h. Sie beträgt ca. 45 s zuzüglich der Umlaufzeit des laufenden Signalprogramms (70 s) in der die Erhebung stattfindet, also insgesamt 115 s. Dementsprechend wird die aktuelle Verkehrsbelastung um 140 s (entspricht zweier Umläufe des Signalprogramms) verschoben.

7.2.5 Auswertung des Verfahrens Ankunft 1

Abbildung 36 zeigt die erhobenen Werte der ankommenden Fahrzeuge in Kfz/h unter Anwendung des Ankunft 1 Verfahrens bei unterschiedlichen Ausstattungsraten von vernetzten Fahrzeugen (100 AvF bis 15 AvF). In dunkelgrün ist die Verkehrsnachfrage (QT1) dargestellt. Bis zu der 935. Simulationssekunde weisen alle AvF eine hohe Abweichung sowie Unterschätzung auf, die mit fortschreitender Simulationszeit geringer wird. Diese liegt daran, dass die Verfahren Abfluss und Staulänge, die für Ankunft 1 genutzt werden, erst anlaufen müssen. Hierfür ist eine gewisse Anzahl an Fahrzeugen, vor allem vernetzter Fahrzeuge, Voraussetzung. Eine qualitative Wiedergabe der Verkehrsnachfrage bis zu einer minimalen AvF von 15 % ist in Abbildung 36 zu erkennen.

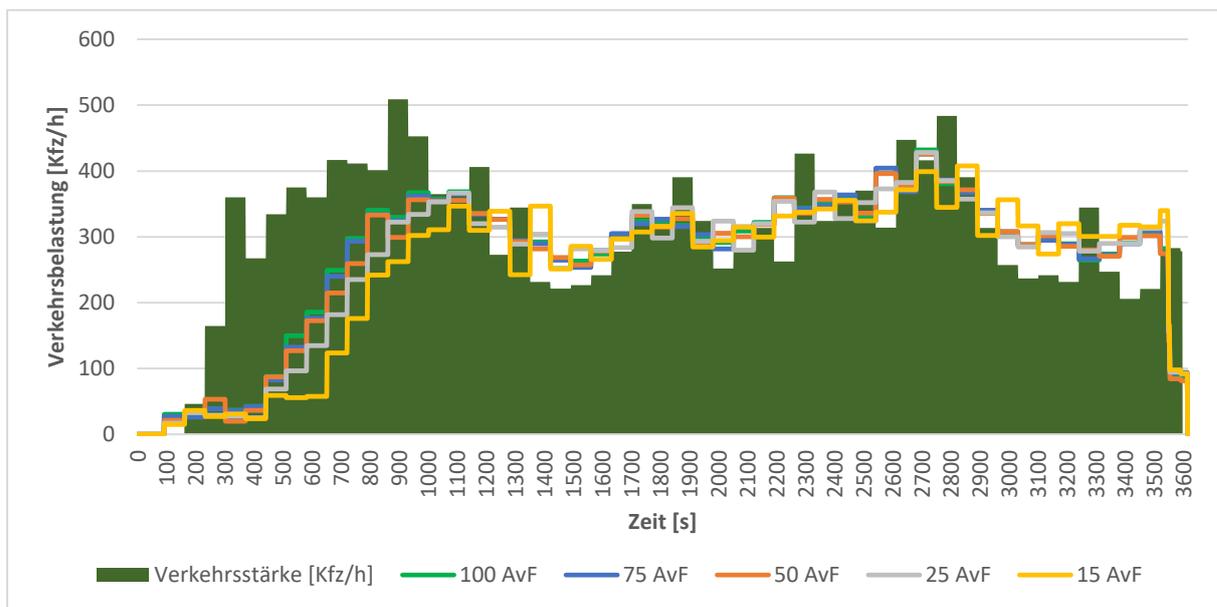


Abbildung 36: Werte Ankunft 1

Abbildung 37 zeigt in Boxplots die Abweichung zwischen der Verkehrsbelastung der Stecke mit der Verkehrsbelastung QT1 und der mittels Ankunft 1 erhobenen Fahrzeuge (Kfz/h). Folglich wird die Differenz zwischen Ankunft 1 und der Verkehrsbelastung aufgezeigt. Die Bestimmung der Abweichung erfolgt erst ab der 935. Simulationssekunde (Beginn bei Rotende/25. Sekunde im Signalzeitenprogramm), da zu diesem Zeitpunkt Ankunft 1 erstmals komplett für alle AvF unter Einbezug eines erfassten Abflusses bestimmt wird. (Kapitel 7.2.3) Im Vorfeld erfolgt die Berechnung meist nur auf Grundlage der erfassten Staulänge. Die Abweichungen von Ankunft 1 weisen bei einer 100prozentigen bis 50prozentigen AvF ähnliche Werte auf, Median und Spannweiten der Abweichung sind ebenfalls fast identisch. Die Mediane der Abweichung liegen zwischen 19,4 Kfz/h und 22,9 Kfz/h, sodass die ankommenden Fahrzeuge leicht überschätzt bestimmt werden (100 AvF, 75 AvF und 50 AvF). Ab einer 25prozentigen AvF nimmt mit sinkender AvF die Spannweite und somit auch die Streuung der Abweichung zu. Zu erkennen ist, dass eine sinkende AvF bis 50 % nicht an Aussagekraft verliert. Erst ab einer 25prozentigen AvF werden deutlich höhere Abweichungen verzeichnet. Generell wird mit Ankunft 1 für die gesamten AvF die Verkehrsbelastung qualitativ abgebildet, allerdings unter einer zunehmenden Streuung der Abweichung der erfassten Werte bei sinkender AvF. Die maximale Abweichungen betragen bei einer 100- bis

50prozentigen AvF ca. 100 kfz/h bis -100 kfz/h sowie bei einer 15prozentigen AvF ca. 115 kfz/h bis hin zu -150 kfz/h. (Ausreißer nicht mit einbezogen)

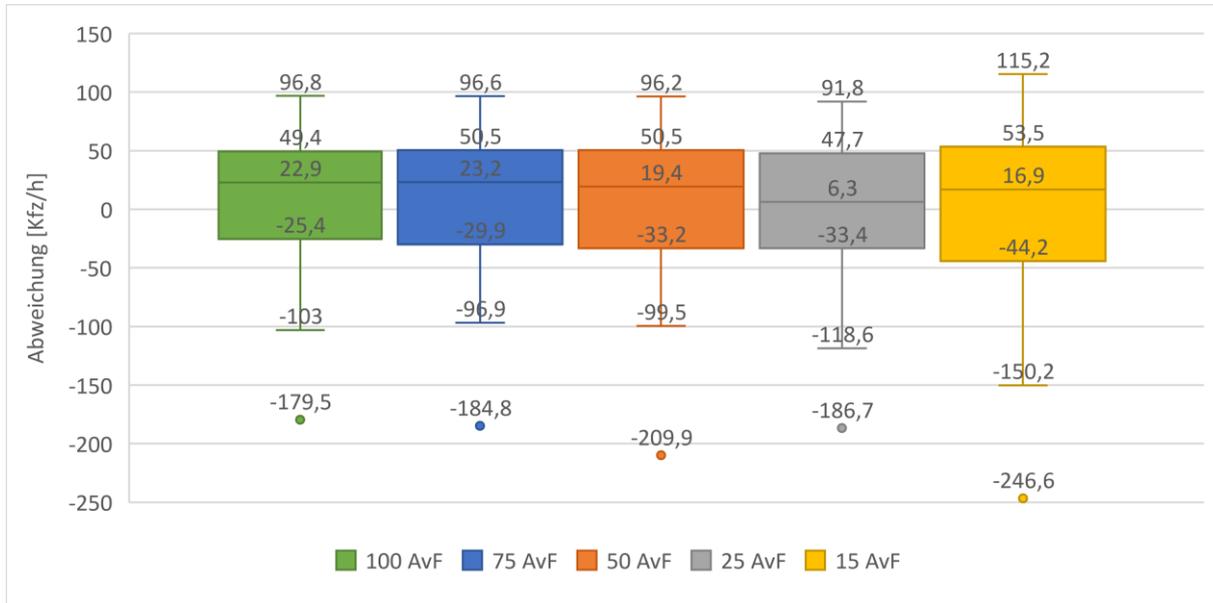


Abbildung 37: Boxplot der Abweichungen von Ankunft 1

7.2.5.1 Betrachtung eines variablen Abflusses

Im Simulationsszenario wird ein konstanter Abfluss angenommen. Das heißt, während jeder Freigabe des Umlaufes passiert jeweils eine konstante Anzahl an Fahrzeugen die Haltelinie der LSA. In der Realität hingegen, variiert dieser Abfluss jedoch ständig. Für die Simulation der Braunschweiger Knotenpunkte wird aus diesem Grund eine Verfahrensweise ausgearbeitet, die diese Gegebenheiten mit berücksichtigt. Unter dem Punkt „Veränderung des Abflusses“ wird dieses Verfahren näher betrachtet. Im Simulationsszenario des generischen Netzes findet das Verfahren aufgrund des angenommenen konstanten Abflusses keine Verwendung.

Aktualisierung eines Abflusswertes

In Simulationsszenarien des Ankunft 1 Verfahrens wird stets ein konstanter maximaler Abfluss an Fahrzeugen pro Freigabe angenommen. Fahrzeuge, die die untersuchte Strecke über die LSA durch Überqueren des Knotenpunktes verlassen, müssen keine weiteren Verkehrsströme beachten. Dementsprechend erfolgt bei allen Abflussbestimmungen der maximale Abfluss. Maximaler Abfluss ist hier gleichzusetzen mit der maximalen Anzahl an Fahrzeugen, die während einer Freigabe des jeweiligen Umlaufes der LSA die Haltelinie passieren.

Fallbeispiel: „Veränderung des Abflusses“

Jeder erfasste Abfluss wird gespeichert und steht für nachfolgende Prozesse zur Verfügung. Wird nun ein geringerer Abfluss X (z.B. drei Fahrzeuge pro Freigabe) als der maximale Abfluss (z.B. sechs Fahrzeuge pro Freigabe) detektiert, wird auch dieser Wert (drei Fahrzeuge pro Freigabe) gespeichert. Erfolgt nun bei einer 100prozentigen AvF während der nächsten zwei Umläufe keine neue Abflussbestimmung, wird angenommen, dass alle Fahrzeuge abgeflissen sind. Das bedeutet, kein Fahrzeug verweilt länger als zwei Umläufe vor der LSA und somit ist der maximale Abfluss (sechs Fahrzeuge) erfolgt. Der letzte vorhandene/gespeicherte Wert X wird nun ohne erneute Abflussdetektion durch den maximalen Abfluss ersetzt. Diese Verfahrensweise kann auch bei sinkender AvF angewandt werden.

7.2.6 Auswertung des Verfahrens Ankunft 2

Abbildung 38 zeigt die ermittelten Werte des Ankunft 2 Verfahrens unter Anwendung unterschiedlicher AvF sowie die tatsächliche Verkehrsbelastung. Die zunächst (0-750 s) recht hohe Abweichung (Unterschätzung) sinkt stetig bei fortlaufender Simulationszeit. Die Staulänge ist noch zu gering, Fahrzeuge verweilen nur für einen Umlauf vor der LSA oder passieren diese ohne Halt. Das heißt, Ankunft 2 funktioniert nur bei einer hohen Aufstauung von Fahrzeugen vor der LSA, bzw. wenn Fahrzeuge mindestens zwei Umläufe vor der LSA verweilen. Aus diesem Grund wird die Bestimmung mittels Ankunft 2 für den Zeitraum von 750-3500 s durchgeführt.

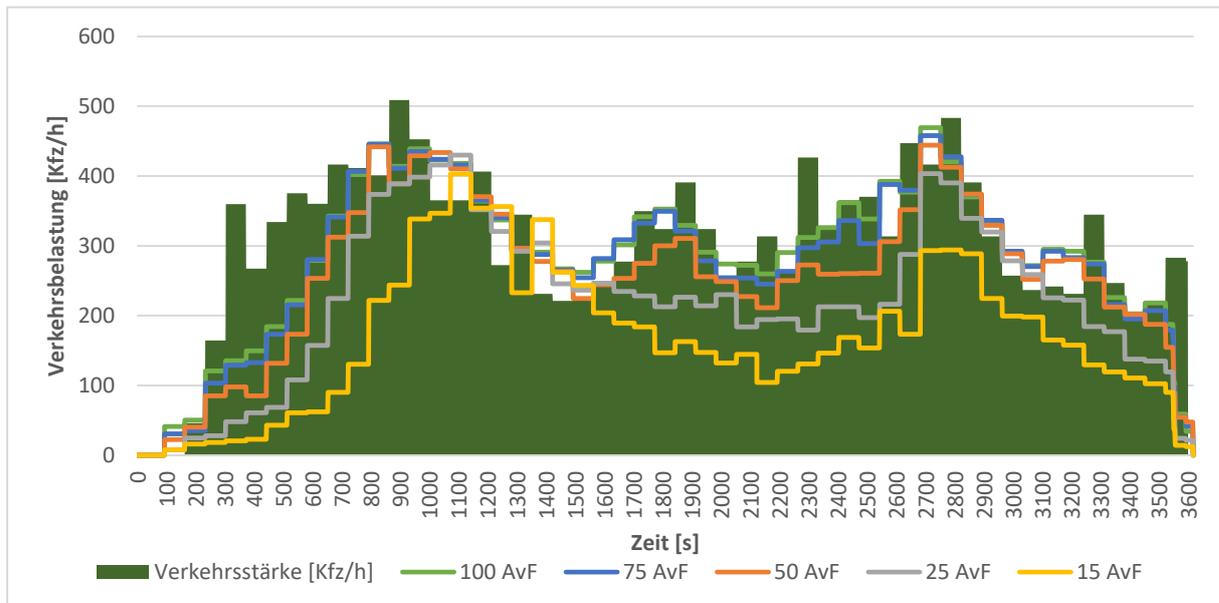


Abbildung 38: Werte Ankunft 2

Die Abweichung zwischen Ankunft 2 und der Verkehrsbelastung ist in Boxplots in Abbildung 39 dargestellt. Bei einer 100prozentigen AvF liegt der Median der Abweichung mit 2,4 kfz/h sehr nahe der Nulllinie und zeugt somit von einer relativ genauen Bestimmung der ankommenden Fahrzeuge. Deutlich zu erkennen ist, dass mit sinkender AvF sich die Streuung der Abweichung erhöht und die ankommenden Fahrzeuge (kfz/h) zunehmend unterschätzt werden. Bei einer 100-bis 50prozentigen AvF wird mittels Ankunft 2 der qualitative Verlauf der Verkehrsbelastung detektiert, jedoch unter einer zunehmenden Streuung der Abweichung und Unterschätzung der erfassten Werte bei gleichzeitig sinkender AvF. Bei einer 75prozentigen AvF beträgt die maximale Abweichung 74 kfz/h bis -129,2 kfz/h. Bei einer 50prozentigen AvF liegt die maximale Abweichung bei 72,7 kfz/h bis -154,1 kfz/h.



Abbildung 39: Boxplot der Abweichungen von Ankunft 2

7.2.7 Auswertung des Verfahrens Ankunft 3

In Abbildung 40 sehen wir die ermittelten Werte des Ankunft 3 Verfahrens unter Anwendung verschiedener AvF. Bis zu einer minimalen AvF von 50 % werden ankommende Fahrzeuge recht gut abgebildet. Bei geringerem Fahrzeugaufkommen (z.B. 0-500 s und 1900-2100 s) brechen die Werte bei einer AvF unter 50 % ein, insbesondere bei der 15prozentigen AvF. Im Gegensatz zu Ankunft 1 und 2 funktioniert Ankunft 3 von der 1. Sekunde an, insbesondere bei niedrigeren Verkehrsaufkommen, da auch durchfahrende vernetzte Fahrzeuge detektiert werden. Der Wirkungsgrad ist jedoch von der Höhe der AvF abhängig.

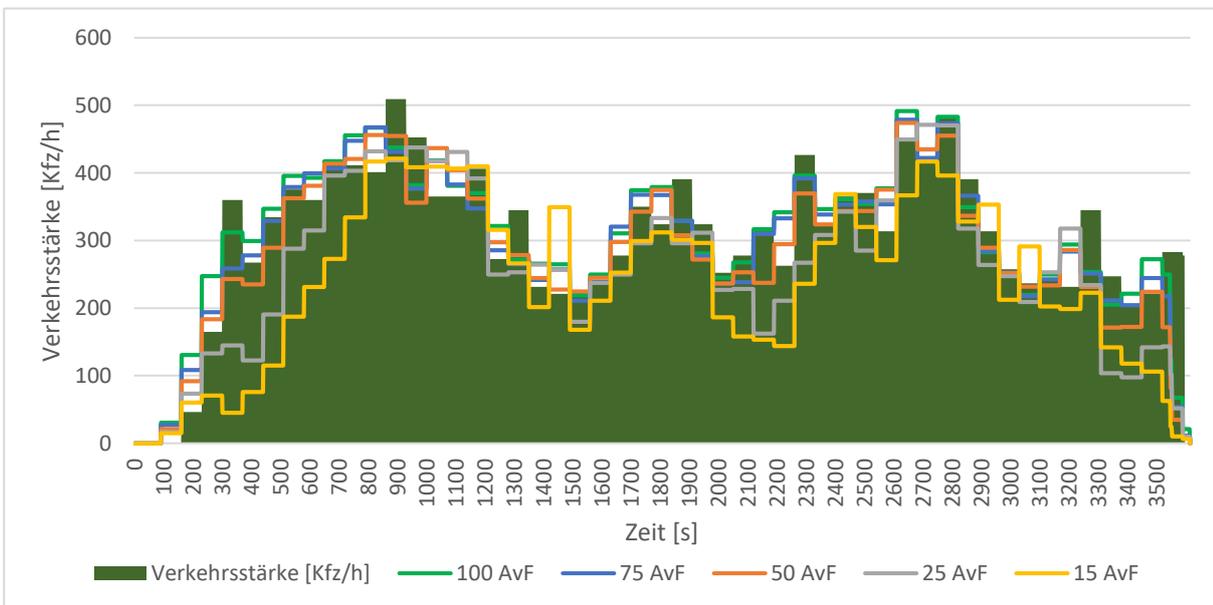


Abbildung 40: Werte Ankunft 3

In Abbildung 41 ist in Boxplots die Abweichung zwischen den erhobenen Werten von Ankunft 3 und der Verkehrsstärke dargestellt. Bei einer 100prozentigen AvF schneidet Ankunft 3 im Vergleich der drei Ankunftsverfahren am besten ab. Ankunft 3 weist die geringste Streuung der Abweichung der ankommenden Fahrzeuge auf. Mit sinkender AvF werden die ankommenden Fahrzeuge zunehmend unterschätzt und die Streuung der Abweichung steigt bei sinkender AvF.

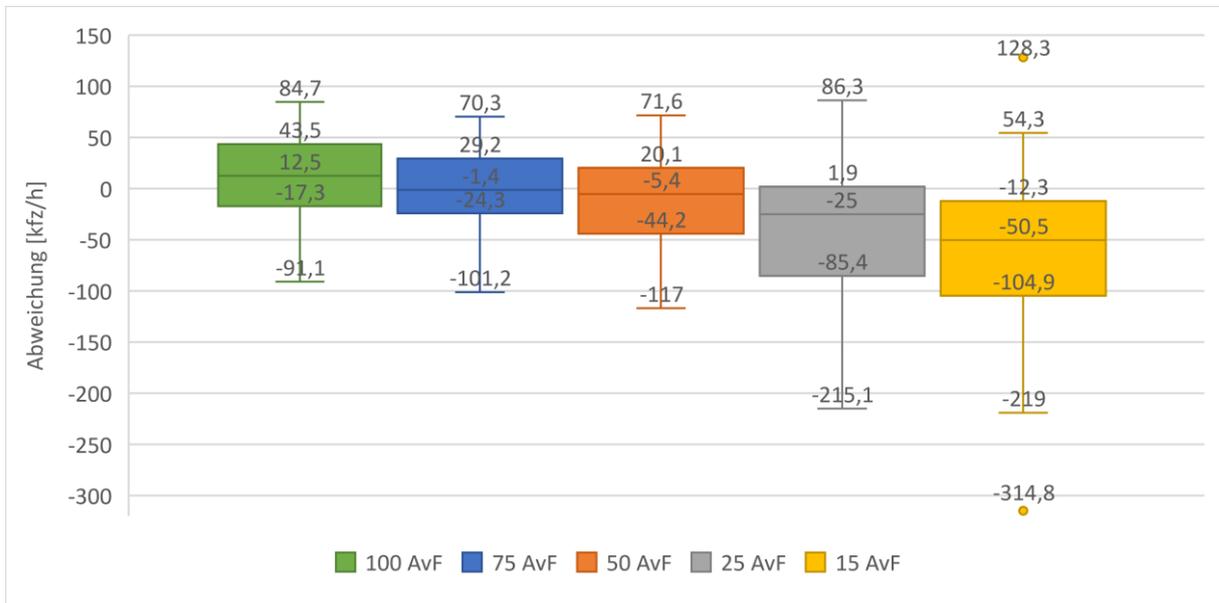


Abbildung 41: Boxplot der Abweichungen von Ankunft 3

Bis zu einer minimalen AvF von 50 % bestimmt Ankunft 3 relativ genau die ankommenden Fahrzeuge. Bei einer 50prozentigen AvF beträgt der Median der Abweichung -5,4 kfz/h, ist also leicht unterschätzt. Für 50 AvF weisen 50 % aller Werte (Interquartilsabstand) eine Abweichung von maximal -44,2 kfz/h bis hin zu 20,1 kfz/h auf. Bei den restlichen 50 % liegt die maximale Abweichung zwischen 71,6 kfz/h und -117 kfz/h. Bei einer AvF von 25 % und 15 % steigt die Streuung der Abweichung sowie die Unterschätzung der Werte signifikant an. Trotzdem ermöglicht Ankunft 3 einen qualitativen Verlauf der Verkehrsbelastung bis zu einer 15prozentigen AvF unterschätzt darzustellen. Eine sinkende AvF geht hier mit einer zunehmenden Streuung der Abweichung sowie einer Unterschätzung der erfassten Werte einher.

7.2.8 Ankünfte 1 , 2 und 3 im Vergleich

Ankunft 1 bis Ankunft 3 beinhalten jeweils unterschiedliche Ansätze und Methoden zur Bestimmung der ankommenden Fahrzeuge einer Strecke eines Fahrstreifens. Daraus resultieren dementsprechend unterschiedliche Abweichungen. Die Abweichungen der drei Ankunftsverfahren unter Anwendung verschiedener AvF werden mittels Boxplots (Abbildung 42) miteinander verglichen. Hierfür wird ein einheitliches Vergleichsintervall (Simulationssekunde 925 bis 3500) zum besseren Vergleich ausgewählt. Somit können Stärken und Schwächen der Ankunftsverfahren untereinander aufgezeigt werden.

Bei einer 100prozentigen AvF schneidet Ankunft 3 im Vergleich der drei Ankunftsverfahren am besten ab. Ankunft 3 weist die geringste Streuung und den besten Median der Abweichung der ankommenden Fahrzeuge auf. Gefolgt von Ankunft 2 mit einer leicht höheren Streuung und ähnlichem Median der Abweichungen. Die Abweichungen von Ankunft 1 weisen einen leicht überschätzten Median und eine ähnliche Spannweite wie Ankunft 2 auf.

Unter Anwendung einer 75prozentigen AvF zeigt Ankunft 3 die geringste Streuung sowie den besten Median der Abweichungen. Ankunft 1 und Ankunft 2 weisen ähnliche Spannweiten der Abweichung auf, wobei Ankunft 1 ausgewogener über- und unterschätzte Ankunftsweite bestimmt.

Unter einer 50prozentigen AvF zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der 75prozentigen AvF.

Die geringste Streuung sowie den besten Median der Abweichungen zeigt Ankunft 1 bei jeweils 25prozentiger und 15prozentiger AvF. Ankunft 3 weist ähnliche Werte auf, unterschätzt jedoch bei sinkender AvF die ankommenden Fahrzeuge zunehmend. Für Ankunft 2 gilt, bei sinkender AvF steigt die Streuung der Abweichung und die Unterschätzung signifikant und der Median der Abweichung sinkt.

Tabelle 3: Ankünfte im Vergleich

AvF	Ankunft 1	Ankunft 2	Ankunft 3
100 AvF	-	o	+
75 AvF	-	o	+
50 AvF	o	-	+
25 AvF	+	-	o
15 AvF	+	-	o

Abweichung [Kfz/h]
Kleiner + o - größer

Beim Vergleich der drei Ankunftsverfahren wird deutlich, dass die aufgezeigten Unterschiede hauptsächlich von der jeweiligen AvF abhängig sind. Ankunft 1 ist am geeignetsten bei einer AvF von weniger als 25 % und Ankunft 3 ist vorteilhaft ab einer 25prozentigen und höheren AvF im Simulationsszenario. (siehe Tabelle 3)

Zu erkennen ist, dass bei Ankunft 3 unter 25 AvF und 15 AvF die Werte im Gegensatz zu Ankunft 1 unterschätzt werden, jedoch Spannweite sowie Interquartilsabstand geringer sind und die Streuung der Abweichung einen niedrigeren Wert aufweist. Hier wäre gegebenenfalls

eine Kombination beider Verfahren denkbar. Z.B. könnte eine Korrektur der Werte der Ankunft 1 mittels Ankunft 3 erfolgen, um optimale Werte zu erzielen.

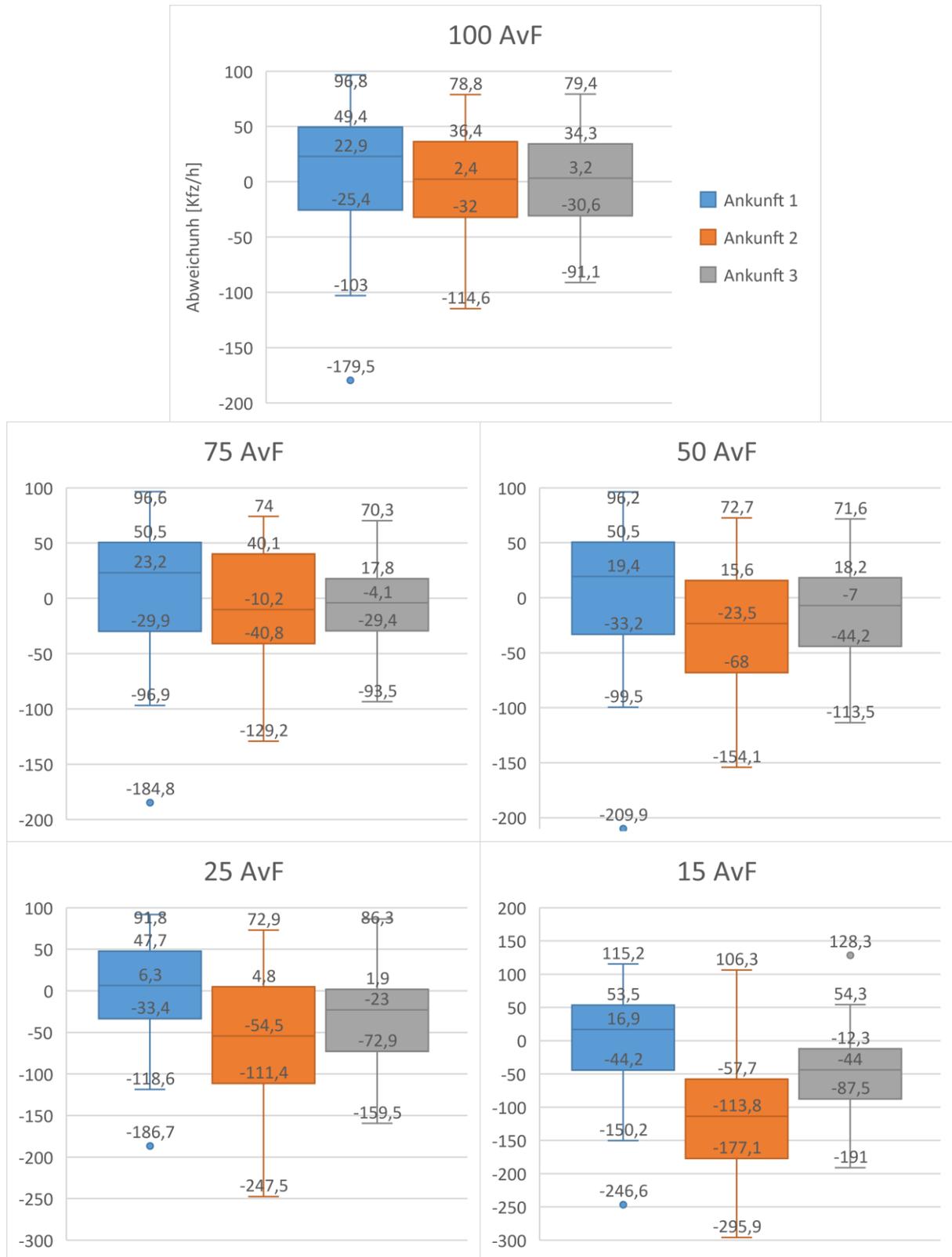


Abbildung 42: Boxplots der Abweichung – Ankünfte im Vergleich (100 AvF - 15 AvF)

7.2.9 Anzahl an Fahrzeugen – Strecke mit LSA

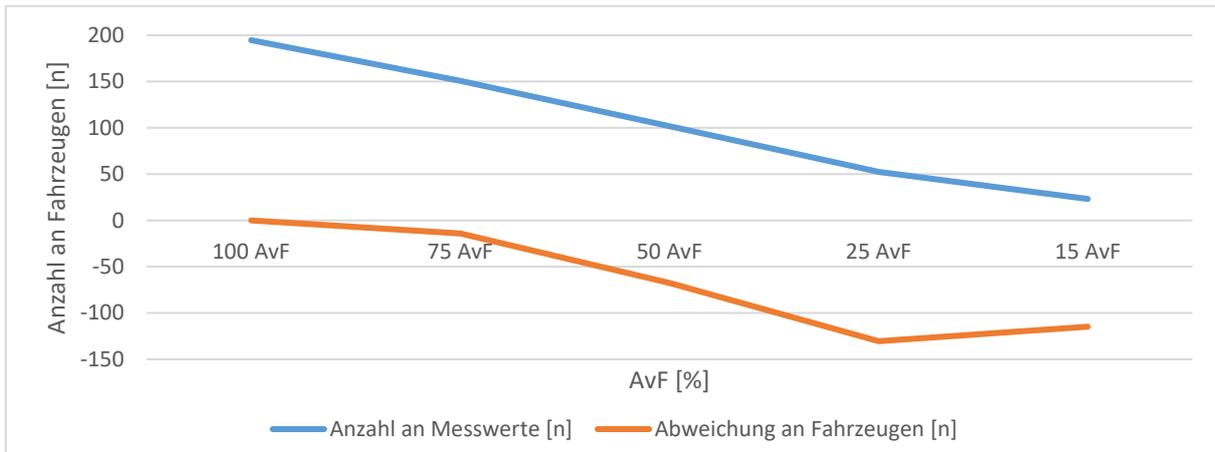


Abbildung 43: Messwerte und die Abweichung an Fahrzeugen

Abbildung 43 zeigt für die verschiedenen AvF die Anzahl der erhobenen Werte innerhalb der Simulation. Die Abweichung der Anzahl an Fahrzeugen ist ebenfalls dargestellt. Während der Simulationszeit von insgesamt 3600 s passieren 310 Fahrzeuge die Strecke. Zu erkennen ist, dass mit sinkender AvF die Anzahl der Messwerte sinkt bei gleichzeitig steigender negativer Abweichung bezüglich der Anzahl an Fahrzeugen. Bei einer 15prozentigen AvF sinkt Abweichung geringer gegen den Trend aufgrund der geringeren Messwerte. Daraus lässt sich schließen, dass sich bei einer 15prozentigen AvF im Verhältnis zu den höheren AvF eine recht starke Abweichung ergibt (Abb. 43)

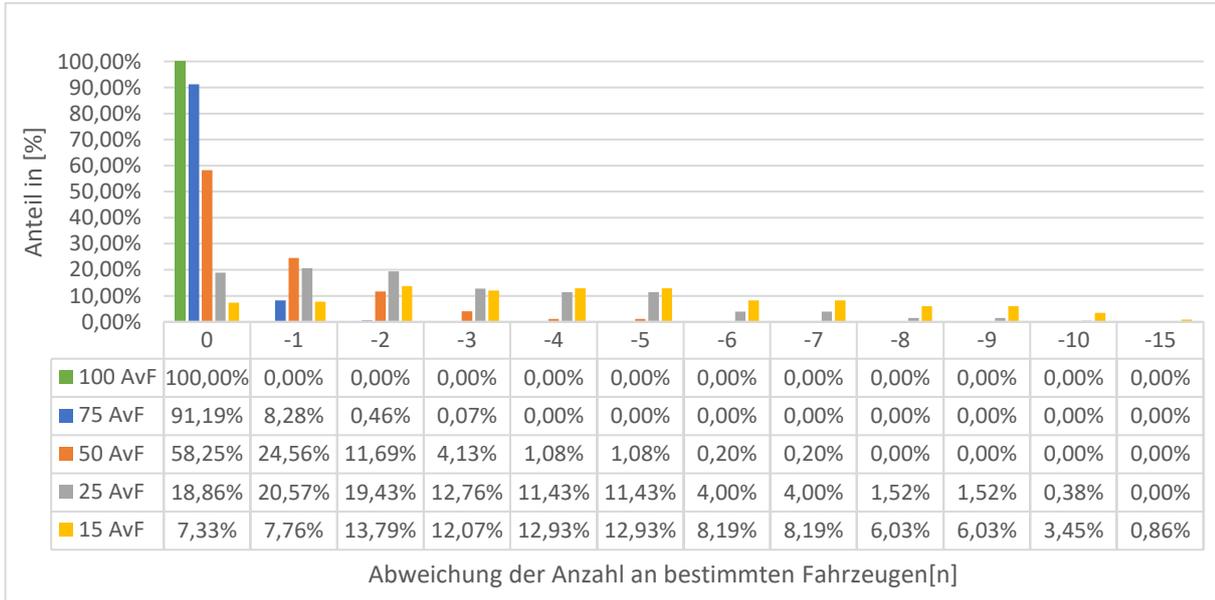


Abbildung 44: Abweichung der Anzahl an erhobenen Fahrzeugen mittels Radar

Abbildung 44 zeigt die Abweichung der Anzahl von Fahrzeugen unter Einsatz verschiedener AvF und deren prozentuale Aufteilung. Die Abweichung stellt hier ausschließlich die Anzahl an Fahrzeugen dar, welche nicht detektiert werden. Mit einer AvF von 100 % kann die Fahrzeuganzahl fehlerfrei bestimmt werden. Bei einer 75prozentigen AvF sind die Abweichungen relativ gering. Hierbei werden 91,19 % der Messwerte fehlerfrei bestimmt. Bei einer 50prozentigen AvF werden ca. 58,25 % der Messwerte einwandfrei bestimmt. Zu einer bereits erheblichen maximalen Abweichung von bis zu 10 Fahrzeugen (Quote der fehlerfreien

Messung = 18,86 %) führt eine 25prozentige AvF. Unter einer Ausstattungsrate von vernetzten Fahrzeugen in Höhe von 15 % sind Messfehler mit einer maximalen Abweichung von fünf Fahrzeugen als relativ hoch anzusehen. Dieses betrifft 53,88 % der Messwerte. Bei den restlichen 48,28 % sind maximale Abweichungen bis zu 15 Fahrzeuge (in 0,86 % der Fälle) möglich. Unter der maximalen Abweichung von zwei Fahrzeugen beträgt diese bei 50 AvF sogar noch 94,5 % der Messwerte. Daraus lässt sich schließen, dass bis zu einer minimalen AvF von 50 % mit dem betrachteten Verfahren die Bestimmung der Anzahl von Fahrzeugen auf einer Strecke möglich ist.

Abbildung 45 zeigt Simulationen mit unterschiedlichen AvF bei gleicher Startzufallszahl des Verfahrens der Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar. Es werden jeweils die Fahrzeuge abgebildet, die sich auf der Strecke/dem Fahrstreifen befinden. Die mittels fahrzeugseitigem Radar detektierten Fahrzeuge werden in gelb dargestellt und die mittels Bestimmung der maximalen Staulänge erhobenen Fahrzeuge werden in blau dargestellt. Addiert man beide Werte, so ergibt sich die Gesamtanzahl an Fahrzeugen auf der Strecke, hier in rot dargestellt. Die graue Kurve visualisiert die sich tatsächlich auf der Strecke befindlichen Fahrzeuge. Zu erkennen ist, dass mit sinkender AvF die Anzahl der erhobenen Werte sinkt und deren Abweichung steigt. Die erhöhte Abweichung wird ersichtlich, indem die roten Datenpunkte sich mit sinkender AvF zunehmend von der grauen Kurve entfernen.

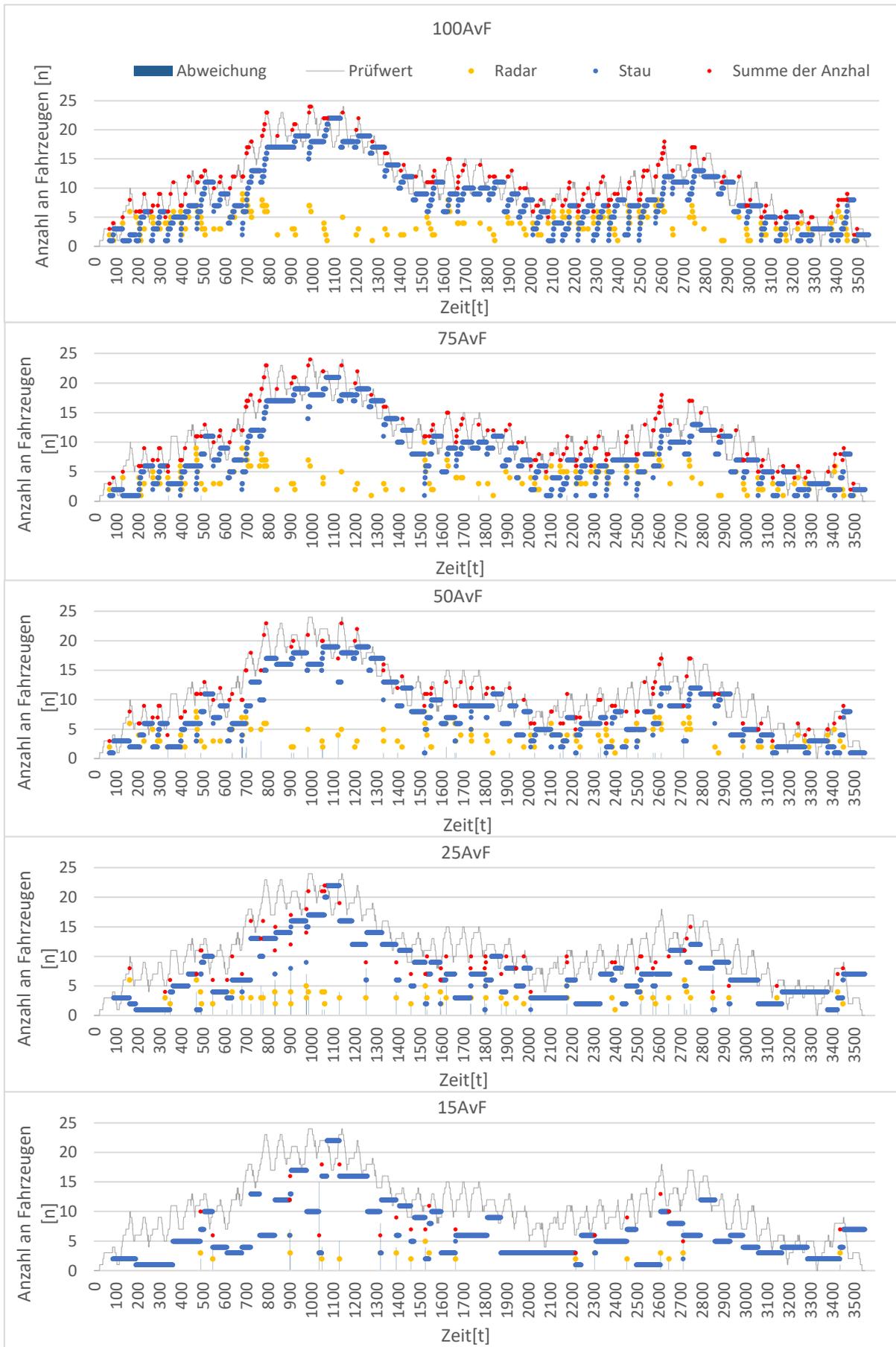


Abbildung 45: Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar (verschiedene AvF bei gleicher Startzufallszahl) – mit LSA

7.3 AUSWERTUNG - STRECKE OHNE LSA

7.3.1 Auswertung der maximalen Staulängenbestimmung - ohne LSA

Für die Auswertung wird eine Vergleichsstaulänge festgelegt, mit der alle anderen Werte unter Einsatz der unterschiedlichen Ausstattungsraten an vernetzten Fahrzeugen (z.B. 75 AvF, 50 AvF, 25 AvF, 15 AvF) verglichen werden. Im Rahmen einer Kontrollerhebung für das Verfahren Bestimmung der Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar (Kapitel 7.2.9) steht die Anzahl an Fahrzeugen zur Verfügung, die sich in einer Aufstauung befinden. Auf Basis dieser Anzahl und der Standardfahrzeuglänge einschließlich dem Standardmindestabstand je Fahrzeug kann die Vergleichsstaulänge errechnet werden. Es erfolgt nun ein Vergleich zwischen den erhobenen Staulängen unter Einsatz der verschiedenen AvF und der Vergleichsstaulänge. Die Abweichungen (Differenz zwischen den erhobenen Werten und der Vergleichsstaulänge) werden in Abbildung 46 aufgezeigt.

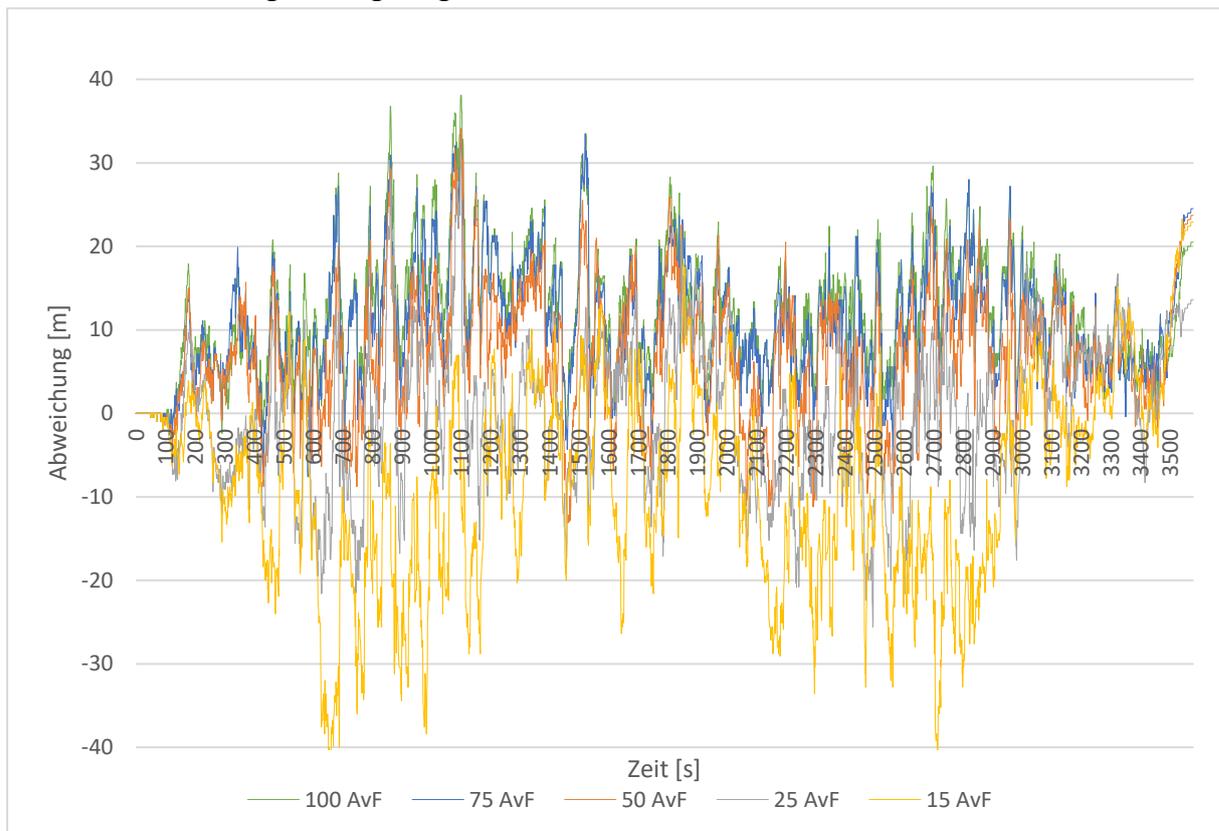


Abbildung 46: Abweichung der max. Staulänge - ohne LSA

Abbildung 47 zeigt Boxplots der Abweichungen, dargestellt in Metern, unter Verwendung unterschiedlicher Ausstattungsraten an vernetzten Fahrzeugen zur Erhebung der Staulänge. Bemerkenswert ist, dass die Abweichungen unter Verwendung einer 100prozentigen und 75prozentigen Ausstattungsrate an vernetzten Fahrzeugen ähnliche Werte aufweisen. Für die beiden Ausstattungsrate liegt der Median der Abweichungen bei 11,3 m und 9,7 m, sodass die Staulänge überschätzt bestimmt wird, bedingt durch sehr lange Aufstauungen (bis maximal 18 Fahrzeuge) an dem vorfahrtsregulierten Knotenpunkt. Die Verteilung der Staulängen über die Simulationszeit ist in einem Boxplot in Abbildung 48 dargestellt. Ein unregelmäßiges Aufrücken der Fahrzeuge hat zur Folge, dass Fahrzeuge stromaufwärts noch stehen und sich einige vor der Haltelinie bereits in Bewegung setzen. Trifft nun ein vernetztes Fahrzeug auf das Stauende, wird der freie Raum zwischen den anfahrenen Fahrzeugen eventuell mitdetektiert.

Dieses Phänomen wurde in Kapitel 6.2.1 bereits näher erklärt. Mit sinkender AvF wird die Staulänge zunehmend überschätzt und die Streuung der Abweichung der Werte nimmt zu. Ist das letzte Fahrzeug in der Aufstauung kein vF, so wird die Aufstauung zu gering bestimmt. Die 25prozentige AvF weist einen nahezu optimalen Median auf. Die Streuung der Abweichung zeigt sich hier jedoch (positiv wie negativ) stärker als bei den höheren AvF. Bei einer 15prozentigen AvF steigt die Streuung/Spannweite der Abweichung signifikant an. Daher ist der Einsatz der Staulängenbestimmung nur bis zu einer minimalen 25prozentigen AvF sinnvoll. Eine maximale Abweichung von 29,3 m der erfassten Staulänge bei einer AvF von 25% entspricht einer Abweichung von ca. 3 Fahrzeugen.

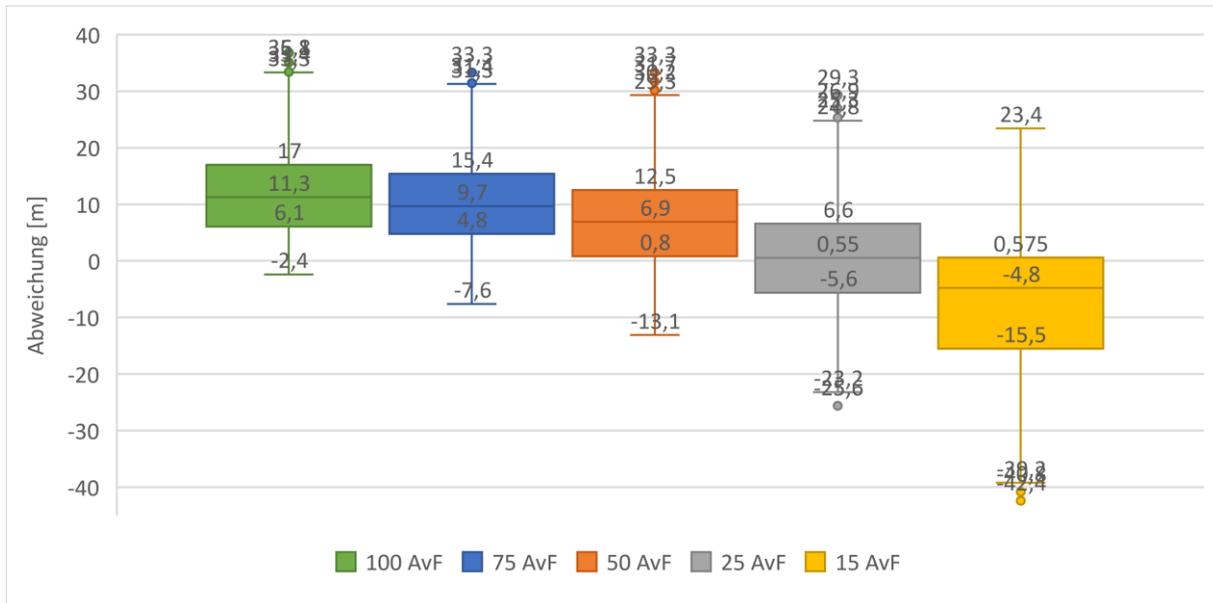


Abbildung 47: Boxplot - Abweichung der max. Staulänge - ohne LSA

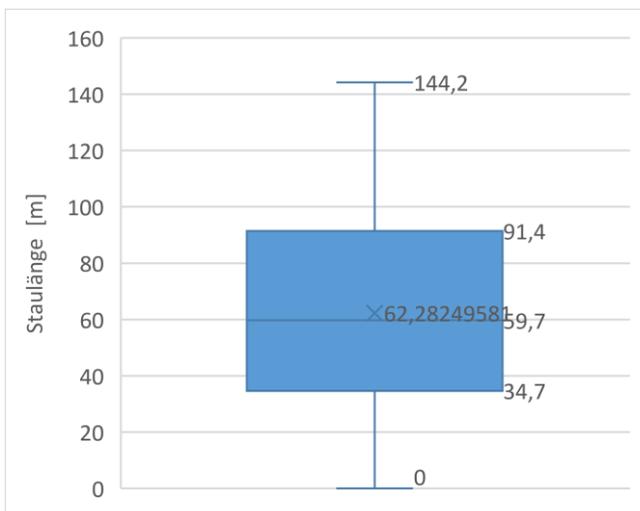


Abbildung 48: Boxplot der Vergleichsstaulänge - ohne LSA

7.3.2 Auswertung des Verfahrens Ankunft 3 - ohne LSA

Abbildung 49 zeigt die erhobenen Werte von Ankunft 3 (ohne LSA) unter Einsatz verschiedener AvF. Bis zu einer minimalen AvF von 50 % werden die ankommenden Fahrzeuge recht gut abgebildet. Bei einer AvF von weniger als 50 % kommt es zur deutlichen Unterschätzung der Verkehrsbelastung. Hier ist gut zu erkennen, dass Ankunft 3 über den gesamten erhobenen Zeitraum Werte generiert.

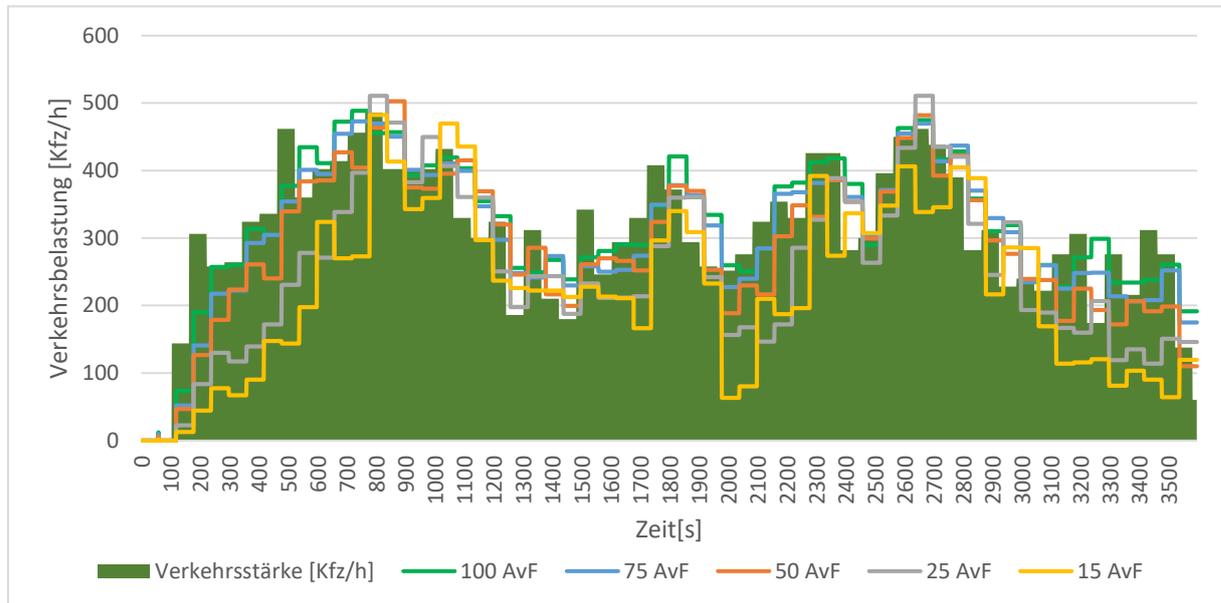


Abbildung 49: Werte der Ankunft 3 (ohne LSA)

In Abbildung 50 wird mit mehreren Boxplots die Abweichung von Ankunft 3 zu der tatsächlichen Verkehrsstärke dargestellt. Bei einer 100prozentigen bis 75prozentigen AvF weisen die Boxplots der Abweichungen ähnliche Spannweiten auf. Mit abnehmender AvF nimmt die Unterschätzung leicht zu. Der Median der Abweichungen der 100prozentigen (bei 2,4 kfz/h), sowie 75prozentigen (bei -7,8 kfz/h) AvF liegt hier nahe der Nulllinie. Bei einer AvF von weniger als 75 % (50 %, 25 % und 15 %) steigt mit sinkender AvF die Streuung der Abweichung sowie die Unterschätzung der Werte signifikant an. Abbildung 50 zeigt, dass Ankunft 3 für eine Strecke ohne LSA bis zu einer minimalen AvF von 75 % Werte mit einer Abweichung von maximal 107,6 kfz/h liefert (mit Ausnahme eines Ausreißers). Bis minimal 15 AvF kann hier mit Ankunft 3 jedoch der qualitative Verlauf der Verkehrsbelastung noch abgebildet werden.

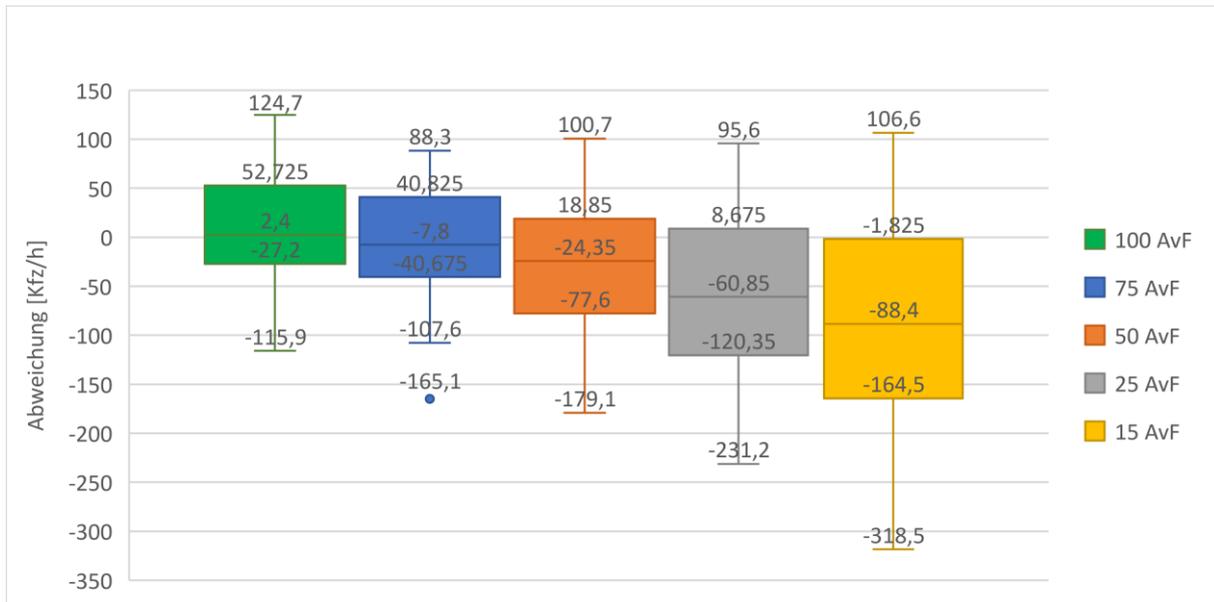


Abbildung 50: Boxplot der Abweichung Ankunft 3 (ohne LSA)

7.3.3 Auswertung des Verfahrens Anzahl an Fahrzeugen - ohne LSA

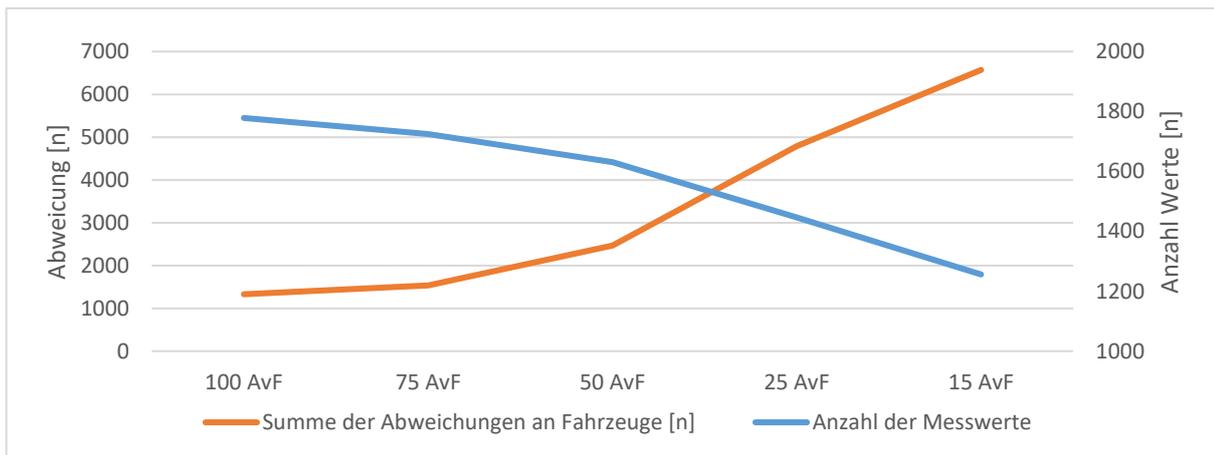


Abbildung 51: Abweichung Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar - ohne LSA

Abbildung 51 stellt die Summe der abweichenden Fahrzeuge sowie die Anzahl dieser Messwerte dar. Bei sinkender AvF reduziert sich gleichzeitig die Anzahl der Messwerte. Des Weiteren steigt die Anzahl an abweichenden Fahrzeugen mit sinkendem Vernetzungsanteil. Die Abweichung wird hier absolut angegeben, das bedeutet negative und positive Abweichungen werden miteinander als Betrag verrechnet. Abbildung 52 zeigt zum einen die absoluten Messwerte/Abweichungen (Gesamtanzahl) und zum anderen die Aufsplittung in positive und negative Werte der Abweichungen. Hier ist zu erkennen, dass mit sinkender AvF die Anzahl an Fahrzeugen zunehmend überschätzt wird.

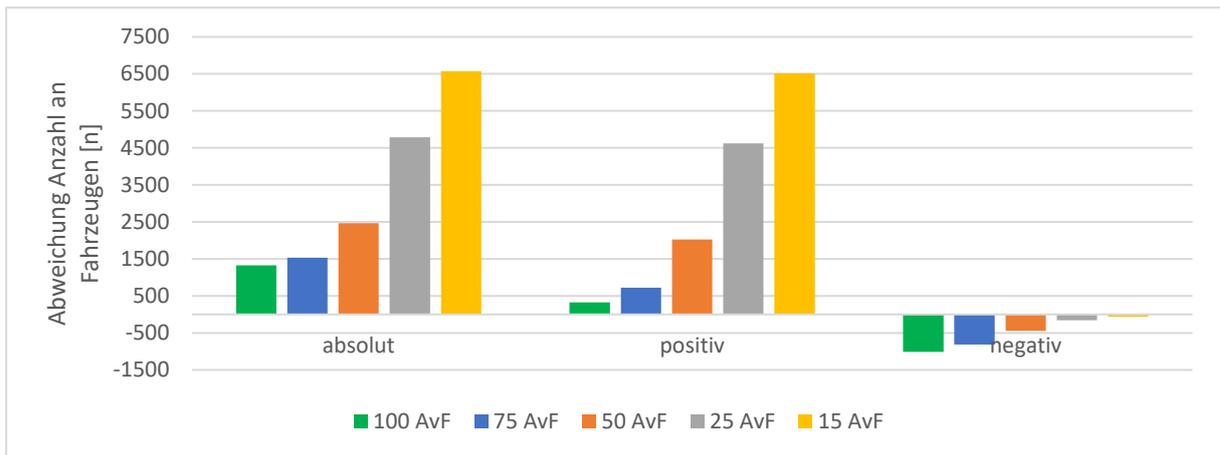


Abbildung 52: Art der Abweichungen

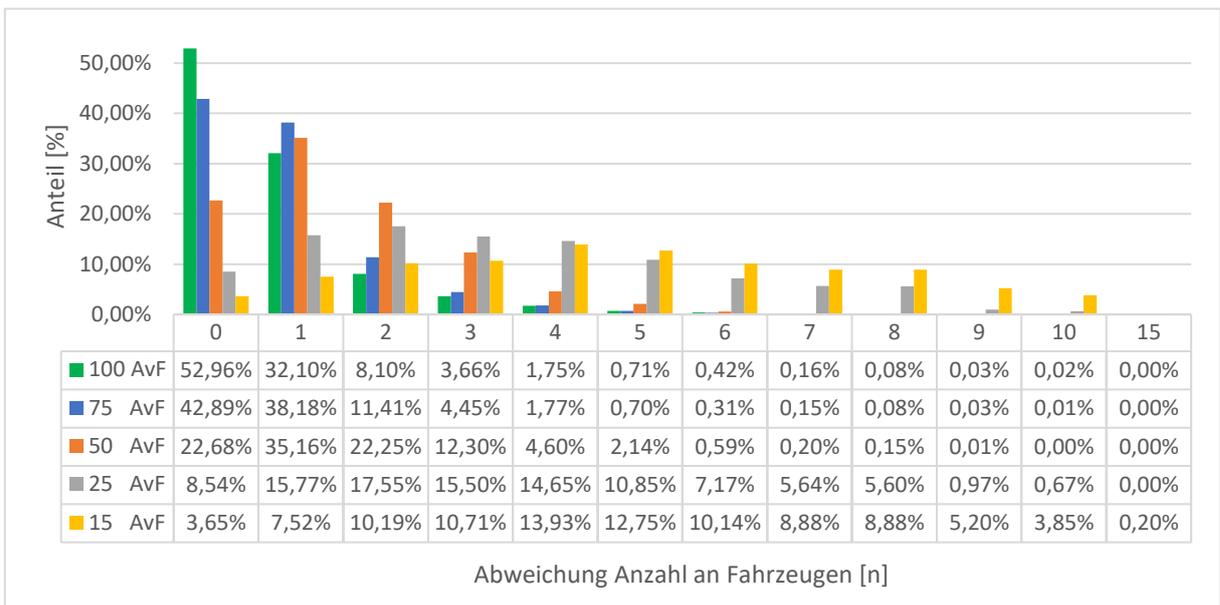


Abbildung 53: Abweichung der Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar - ohne LSA

Abbildung 53 stellt die Abweichung der Anzahl von Fahrzeugen bei verschiedenen AvF und deren prozentuale Aufteilung dar. Die Angabe erfolgt als absolute Abweichung. Bei einer 100prozentigen AvF werden unter einer Varianz von lediglich zwei Fahrzeugen 93,16 % der Fahrzeuge detektiert. Da hier die Anzahl der Fahrzeuge über die Staulänge bestimmt wird und dies bei einer Strecke ohne LSA zu Varianzen führen kann, erklärt das wiederum die Fehlerrate. Fahrzeuge, die sich innerhalb der Aufstauung befinden, werden nicht für die Bestimmung, mittels Radar herangezogen. Bei einer 75prozentigen AvF werden mit einer Varianz von zwei Fahrzeugen 92,48 % der Fahrzeuge korrekt detektiert, bei 50 AvF beträgt der Wert 80,09 % bei einem maximalen Fehler von zwei Fahrzeugen und bei 25 AvF bei gleicher Fehlertoleranz beträgt der Wert 41,86 %. Hingegen weist eine 15prozentige Ausstattungsrate an vernetzten Fahrzeugen mit 21,36 % und einer Abweichung von zwei Fahrzeugen einen recht niedrigen Wert auf. Ab einer minimalen 25prozentigen AvF wird die Streuung der Abweichung zu groß, um verlässliche Werte zu liefern. Zusammenfassend kann man hier zu der Schlussfolgerung kommen, dass bis zu einer minimalen AvF von 50 % noch 80,09 % der bestimmten Werte mit einer maximalen Abweichung von zwei Fahrzeugen bestimmt werden können und somit eine 50prozentigen AvF die minimale Grenze einer akzeptablen Abweichung markiert.

Abbildung 54 zeigt Simulationen unter Anwendung unterschiedlicher Ausstattungsraten vernetzter Fahrzeuge bei gleicher Startzufallszahl (12) zur Bestimmung der Anzahl der Fahrzeuge. Die roten Datenpunkte stellen die Anzahl an Fahrzeugen dar, ermittelt aus Staulänge und Radar. Die graue Kurve visualisiert die sich tatsächlich auf der Strecke befindlichen Fahrzeuge und ist gleichzeitig der Referenzwert für die Fahrzeuganzahl auf einer Strecke. Die dunkelblauen Baken, welche sich direkt auf der X-Achse/Zeitachse befinden, geben die Abweichung zwischen der tatsächlichen Fahrzeuganzahl (graue Kurve, Referenzwert für die Fahrzeuganzahl) und dem Messwert des Verfahrens (rote Datenpunkte) an. Es wird deutlich, dass mit sinkender AvF die Anzahl der Messpunkte sinkt. Bei hohen AvF (100 AvF – 50 AvF) werden positive sowie negative Abweichungen bestimmt. Bei sinkender AvF werden diese Abweichungen überwiegend positiv.

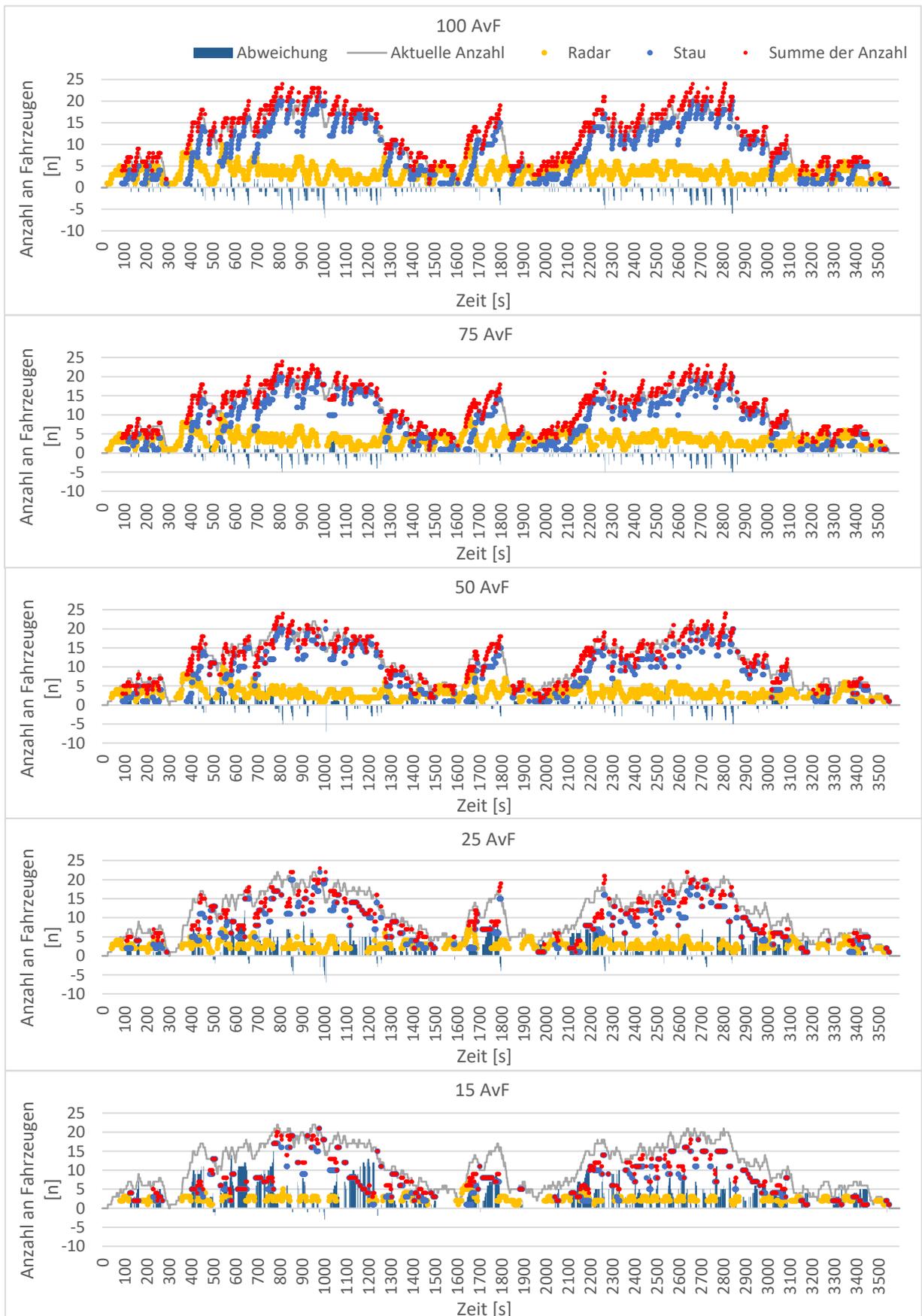


Abbildung 54: Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar (verschiedene AvF bei gleicher Startzufallszahl) – ohne LSA

8 SZENARIO - REALER STRECKENZUG IN BRAUNSCHWEIG

8.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET – BRAUNSCHWEIGER KNOTENPUNKTE

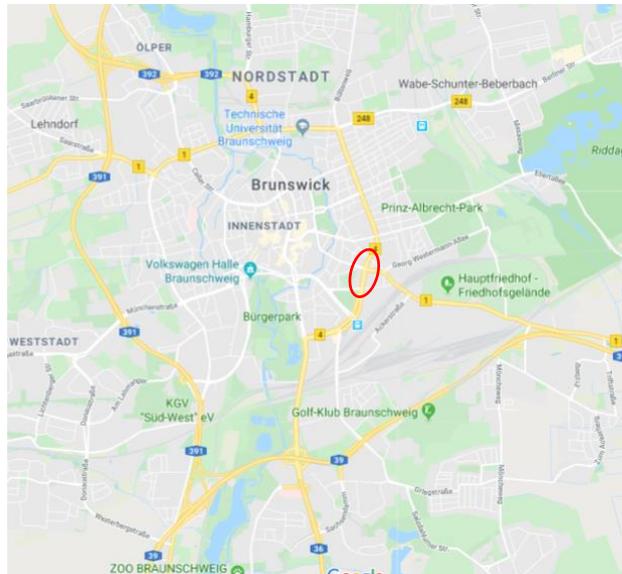


Abbildung 55: Braunschweig - Lage der Knotenpunkte [Google]

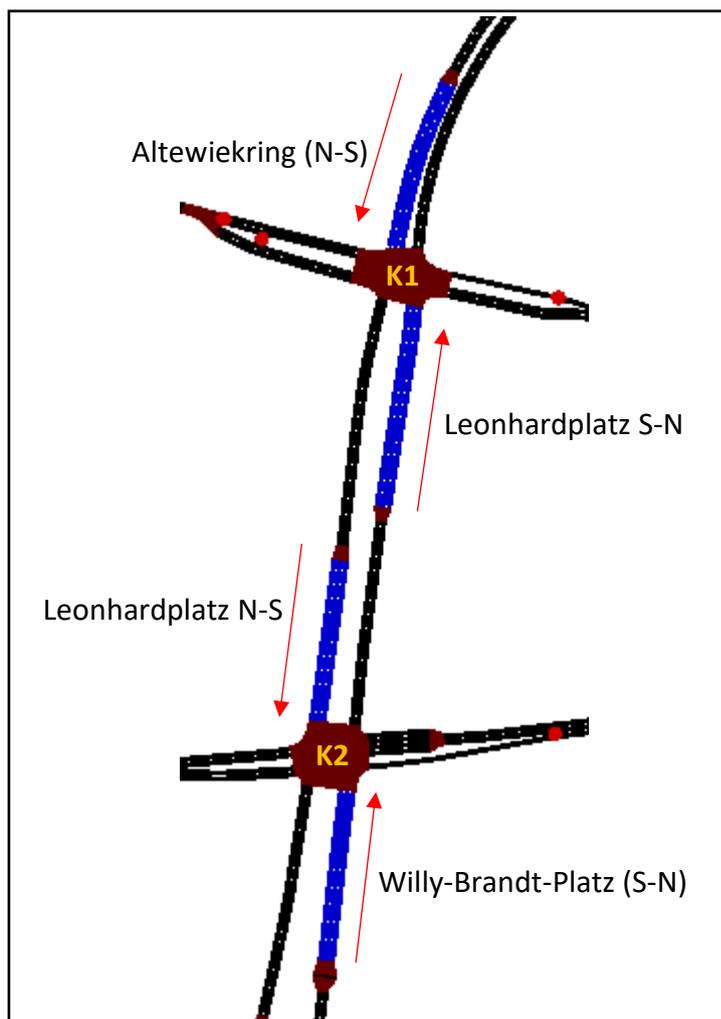


Abbildung 56: Knotenpunkte: K1 und K2

Kurzbeschreibung:**Knotenpunkt 1 (K1):** Leonhardplatz - Leonhardstraße - Altewiekring**Knotenpunkt 2 (K2):** Willy-Brandt-Platz - Ottmerstraße - Schillstraße – Leonhardplatz

Mithilfe der beiden signalisierten Braunschweiger Knotenpunkte (K) K1 und K2 werden die erarbeiteten Verfahren in einer simulativen Abbildung einer realen innerstädtischen Infrastruktur getestet. Die Knotenpunkte liegen im Süd-Osten von Braunschweig und sind Teil des Braunschweiger Rings. K1 ist die Kreuzung des Leonhardplatzes mit der Leonhardstraße sowie dem Altewiekring. Knotenpunkt 2 ist die Kreuzung vom Willy-Brandt-Platz mit der Ottmerstraße, der Schillstraße und dem Leonhardplatz. Der innerstädtische Verkehr von Süd nach Nord und umgekehrt passiert diese beiden Knotenpunkte. Des Weiteren wird der Verkehr von Osten über diese beiden Knotenpunkte geführt. Fahrzeuge, die die Abfahrt der A39 im Osten nutzen, passieren ebenfalls diese Knotenpunkte. Südlich der beiden Knotenpunkte liegt ein Anschluss der A39 nach Westen führend sowie ein Anschluss der A36 nach Süden führend. An beiden KP passieren zwei Straßenbahnlinien (M5, M4) sowie 4 Buslinien (429, 419, 411, 436), die in den Hauptverkehrszeiten im 10 Minutentakt fahren. Hinzu kommen noch drei Buslinien (730, 430, 482), welche im Stundentakt fahren.

8.2 ANNAHMEN IN DER SIMULATION

Die Bus- sowie Straßenbahnlinien werden in der Simulation nicht abgebildet. Die verkehrabhängigen LSA-Steuerungen werden in Festzeitsteuerungen abgeändert. Hier läuft eine ähnliche LSA-Steuerung wie das reale verkehrabhängige LSA-Programm (rekonstruiert aus Feldbeobachtungen). Auf die Simulation von Fußgängern und Radfahrern wird hier verzichtet. Die Verkehrsnachfrage wird aus Detektordaten vom 11.02.19 von umliegenden Induktionsschleifen der Knotenpunkte generiert. Simuliert wird eine Stunde von 16:30 Uhr bis 17:30 Uhr. Auch hier finden 10 Simulationen mit 10 unterschiedlichen Zufallszahlen für jede AvF statt.

Gegebenheiten des realen Straßennetzes

Im realen Braunschweiger Szenario weist ein Verkehrsstrom mehrere Fahrstreifen bzw. Mischfahrstreifen (mehrere Verkehrsströme teilen sich einen Fahrstreifen) auf. Ein Fahrstreifenwechsel zwischen zwei Fahrstreifen ist auf dieser Strecke also möglich. Das generische Netz aus Kapitel 7 hingegen weist nur einen Fahrstreifen je Verkehrsstrom und Strecke auf. Infolgedessen müssen bestimmte Mechanismen ergänzt bzw. modifiziert werden, um einen reibungslosen Ablauf der erarbeiteten Verfahren gewährleisten zu können. In diesem Zuge erfolgt eine Anpassung des Verfahreners Abfluss, Ankunft 1, und Ankunft 3 (Kapitel 8.4).

Umsetzung der Fahrbahnaufweitung in der Simulation

Jede Fahrbahnaufweitung wurde so modelliert, dass ein Fahrstreifenwechsel nur bei gleicher Verkehrsstromzugehörigkeit bzw. bei gleicher Signalgruppenzugehörigkeit durchgeführt wird. In der Simulation ordnen sich alle Fahrzeuge, die sich auf der Strecke mit zwei Fahrstreifen befinden (1, Abb. 57), bereits vor der Aufweitung auf drei Fahrstreifen (2, Abb. 57) richtig für den jeweiligen Verkehrsstrom ein.

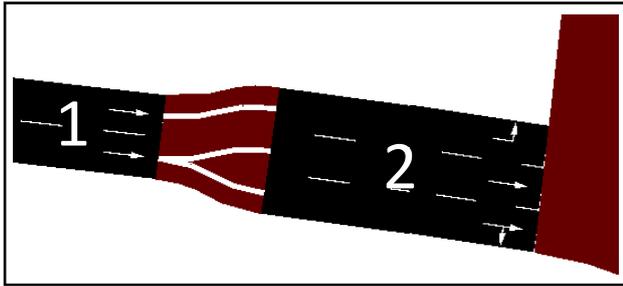


Abbildung 57: Fahrbahnaufweitung

8.3 ERHOBENE FAHRSTREIFEN

Es werden jeweils die Fahrstreifen der nördlichen und südlichen Knotenarme der Knotenpunkte (K1, K2) untersucht (Abb. 58). Auf insgesamt vier Knotenarmen und 12 Fahrstreifen werden folgende Verfahren angewendet: **maximale Staulänge, Abfluss, Ankunft 1, Ankunft 2, Ankunft 3 und Anzahl der Fahrzeuge mittels Radar**. Die Erhebung beinhaltet folgende Verkehrsströme und Fahrstreifen:

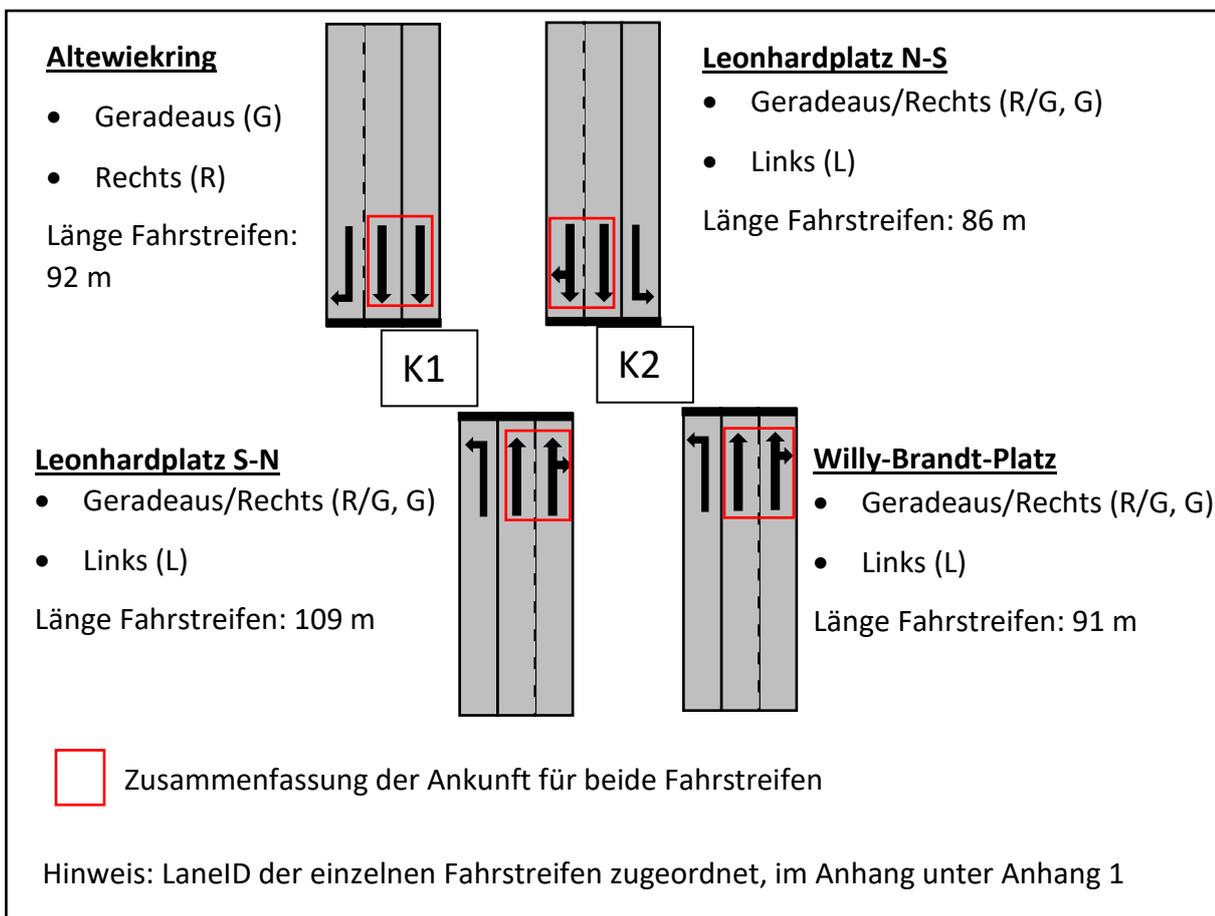


Abbildung 58: Erhobene Fahrstreifen und Verkehrsströme

Besonderheit Ankunftserhebung

Für jeden Fahrstreifen werden die Staulänge, der Abfluss und die Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar, bestimmt. Für Verkehrsströme mit zwei Fahrstreifen wird die Ankunftserhebung zusammengefasst (Roter Kasten, Abb. 58), da hier Fahrstreifenwechsel möglich sind und dadurch Berücksichtigung finden. Für Verkehrsströme mit nur einem Fahrstreifen erfolgt die Erhebung der Ankunft für jeden einzelnen Fahrstreifen. Hier wird nicht wie in Kapitel 7.2.4 die Verkehrsbelastung für die Auswertung verschoben. Die erhobene Strecke und deren Fahrstreifen sind relativ kurz und die Reisezeit zum Passieren kann hier vernachlässigt werden.

8.4 ERGÄNZUNGEN AUFGRUND EINES EFFIZIENTEN VERKEHRSABLAUFES

Ergänzung des Ankunft 1 Verfahrens mit der Schätzung des Abflusses

Wird innerhalb zweier Umläufe kein Abfluss bestimmt, so wird (wie bereits in Kapitel 7.2.5.1 erwähnt) angenommen, dass ein maximaler Abfluss erfolgt ist. Diese Annahme ist Bestandteil bei der Simulation der BS-Knotenpunkte bezüglich der Abflussbestimmung. Aus Beobachtungen von SUMO Simulationen wurde festgestellt, dass alle zwei Freigabesekunden ein Fahrzeug abfließt. Diese Beobachtung wird für die Schätzung des Abflusses übernommen. Für die vorliegende Simulation wird dieser Beobachtungswert, jedoch auf 3,5 s Freigabezeit angehoben (geschätzt). Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass während einer Freigabe zeitliche Lücken entstehen, in denen keine Fahrzeuge die Haltelinie passieren. Aus diesem Grund erfolgt ein Aufschlag von 1,5 s ($2 \text{ s} + 1,5 \text{ s} = 3,5 \text{ s}$) Diese Abflussschätzung ist für die Verkehrsströme Geradeaus und Geradeaus/Rechts im BS-Simulationsszenario essenziell, da so gut wie kein Fahrzeug hier länger als einen Umlauf vor der LSA warten muss. Somit findet keine Bestimmung des Abflusses statt, welche für das Ankunftsverfahren 1 benötigt wird.

8.5 BESONDERHEIT FAHRSTREIFENWECHSEL

Im generischen Netz fließen Fahrzeuge nur auf Grund einer Freigabe/Grünsignalisierung ab. Hier ist es nun möglich, dass Fahrzeuge aus der Aufstauung heraus (Fahrstreifen 1, Abb. 59) einen Fahrstreifenwechsel vornehmen (Car B, Abb. 59), da der angrenzende Fahrstreifen eine geringere Aufstauung aufweist (Fahrstreifen 2, Abb. 59). Dadurch entsteht eine Lücke X (X, $t = +1$, Abb. 59) in der Aufstauung und verursacht einen Fehler bei der Bestimmung von Ankunft 1 und Ankunft 3.

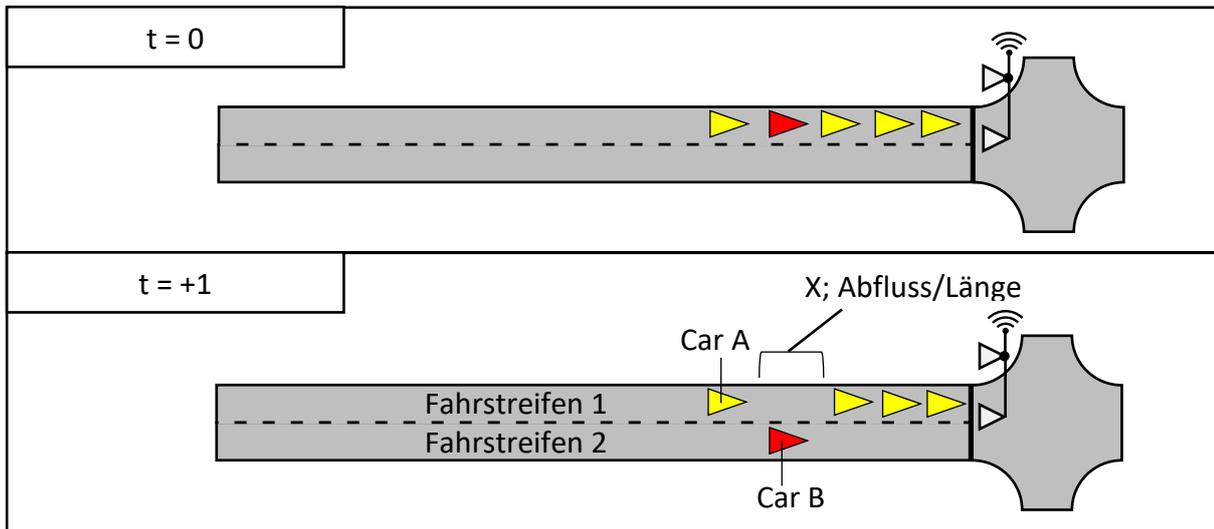


Abbildung 59: Fahrstreifenwechsel

Anpassung des Abflussverfahrens (Ankunft 1)

Durch die entstandene Lücke X (Abb. 59) kann es nicht nur auf Grund einer Freigabe zum Aufrücken von Fahrzeugen kommen. In Abbildung 59 rückt das Fahrzeug Car A (Abb. 59) auf, da das Car B einen Fahrstreifenwechsel von Fahrstreifen 1 nach Fahrstreifen 2 vorgenommen hat. Car A bestimmt somit einen Abfluss in der Länge von Car B. Diese Abflussbestimmung ist jedoch nicht korrekt. Daher wird implementiert, dass ein vernetztes Fahrzeug nur einen Abfluss bestimmen kann, wenn es bei Freigabe (Grün) des betreffenden Signalgebers des Fahrstreifens angefahren ist. Darauf hinzuweisen ist, dass dieser Mechanismus nur für Verkehrsströme verwendet werden kann, die absolute Vorfahrt bei ihrer Freigabe haben. Für den Verkehrsablauf mit bedingtverträglichen Strömen müssten weitere Mechanismen erarbeitet werden, da es hier auch während der Freigabe zu Zwischenstopps und erneuten Anfahren der Fahrzeuge kommen kann.

Anpassung des Ankunft 3 Verfahrens

Car B (Abb. 59), welches den Fahrstreifenwechsel vorgenommen hat, hat hier selbst Ankunft 3 bestimmt oder wurde bei einer Ankunft 3 Bestimmung mit einbezogen. Wenn Car B den Fahrstreifen wechselt, ist Car B nicht mehr auf Fahrstreifen 1. Somit wird nach detektiertem Wechsel, die Fahrzeuglänge von dem Wert der Ankunft 3 des Fahrstreifens 1 abgezogen. Es wird also sichergestellt, dass ein vernetztes Fahrzeug bei einem Fahrstreifenwechsel nicht mehrfach erhoben wird.

Ein vernetztes Fahrzeug kann diesem Fehler entgegenreten, indem es seinen Fahrstreifenwechsel selbst detektiert. Hierfür wird ein Fahrstreifenerkennungssystem genutzt. Dies kann eine Kamera sein, die hinter dem Innenspiegel eines Fahrzeuges angebracht ist. Mit Hilfe des Kamerabildes und Algorithmen kann die Fahrbahnmarkierung erkannt werden. Fahrstreifenerkennungssysteme sind in warnenden Assistenzsystemen, wie

z.B. Lane Departure Warning-System (LDW) oder Advanced Lane Departure Warning-System (ALDW) verbaut. Komfortassistenten, wie z.B. Lane Keeping Support (LKS) oder intervenierend Sicherheitssysteme wie z.B. Lane Departure Prevention (LDP), enthalten ebenfalls ein Fahrstreifenerkennungssystem. Mittels Fahrstreifenerkennungssystemen kann nun ein Fahrstreifenwechsel detektiert und erfasst werden. [Winner et al.] (S.545)

Mithilfe der Detektion von vorausfahrenden Verkehrsteilnehmern können Rückschlüsse auf Markierungen gezogen werden, wenn diese verdeckt sind. Hierzu wird die freiwerdende Fläche hinter dem vorausfahrenden Fahrzeug genutzt und analysiert. [Cech et al.] (S.86-89)

8.6 AUSWERTUNG DER BRAUNSCHWEIGER KNOTENPUNKTE

In der Auswertung werden einige Abkürzungen verwendet. Diese Abkürzungen sind nachfolgend beschrieben. Für die Darstellung der Graphen wird eine einheitliche Legende erarbeitet und gilt für alle weiteren Graphen (Legende in: Abb. 60: Staulänge Leonhardplatz S-N R/G, G, L; Abb.64: Willy-Brandt-Platz L A1; Abb.67: Willy-Brandt-Platz L Ab. A1)

Richtungsfahrstreifen der Verkehrsströme:

R = Rechts

G = Geradeaus

L = Links

Abkürzungen der Abbildungsbezeichnungen:

A1 = Graph der Ergebnisse des Ankunftsverfahrens 1 mit verschiedenen AvF

A2 = Graph der Ergebnisse des Ankunftsverfahrens 2 mit verschiedenen AvF

A3 = Graph der Ergebnisse des Ankunftsverfahrens 3 mit verschiedenen AvF

Ab. = Boxplot der Abweichungen des Ankunftsverfahren mit verschiedenen AvF

Max = Maximale Staulänge

∅ = Durchschnitt der *Staulängen*

8.6.1 Auswertung der maximalen Staulänge

Die Auswertung der erfassten Staulängen auf den 12 Fahrstreifen mit verschiedenen AvF ist in Abbildung 60 bis Abbildung 63 dargestellt.

Mit sinkender Ausstattungsrate wird die Staulänge zunehmend unterschätzt und die Streuung der Abweichung nimmt zu. Der Median verschlechtert sich geringfügig bei der Mehrzahl der Fahrstreifen mit abnehmender AvF. Zu erkennen ist auch, dass der Median der Abweichung bei der Mehrheit der Fahrstreifen bei einer 15prozentigen AvF akzeptabel von der Nulllinie abweicht. Bis zu einer minimalen AvF von 50 % erreichen die erfassten Staulängenwerte akzeptable Abweichungen. Die positive sowie negative Abweichungen bei einer 50prozentigen AvF erreichen hier die Hälfte der durchschnittlichen Staulänge oder zum Teil auch den kompletten Durchschnitt. Der Interquartilsabstand, also 50 % der Werte weisen jedoch eine geringe Abweichung auf. Ist das letzte Fahrzeug in der Aufstauung kein vernetztes Fahrzeug, so führt dies zu negativen Abweichungen. Zu positiven Abweichungen kommt es, wenn bei der Bestimmung der Staulänge die Fahrzeuge im vorderen Teil der Aufstauung bereits anfahren, im hinteren Teil jedoch noch stehen.

Max: 68,6 m \varnothing 32,7 m

Max: 67,7 m; \varnothing 37,9 m

Max: 55 m \varnothing ; 27,4 m

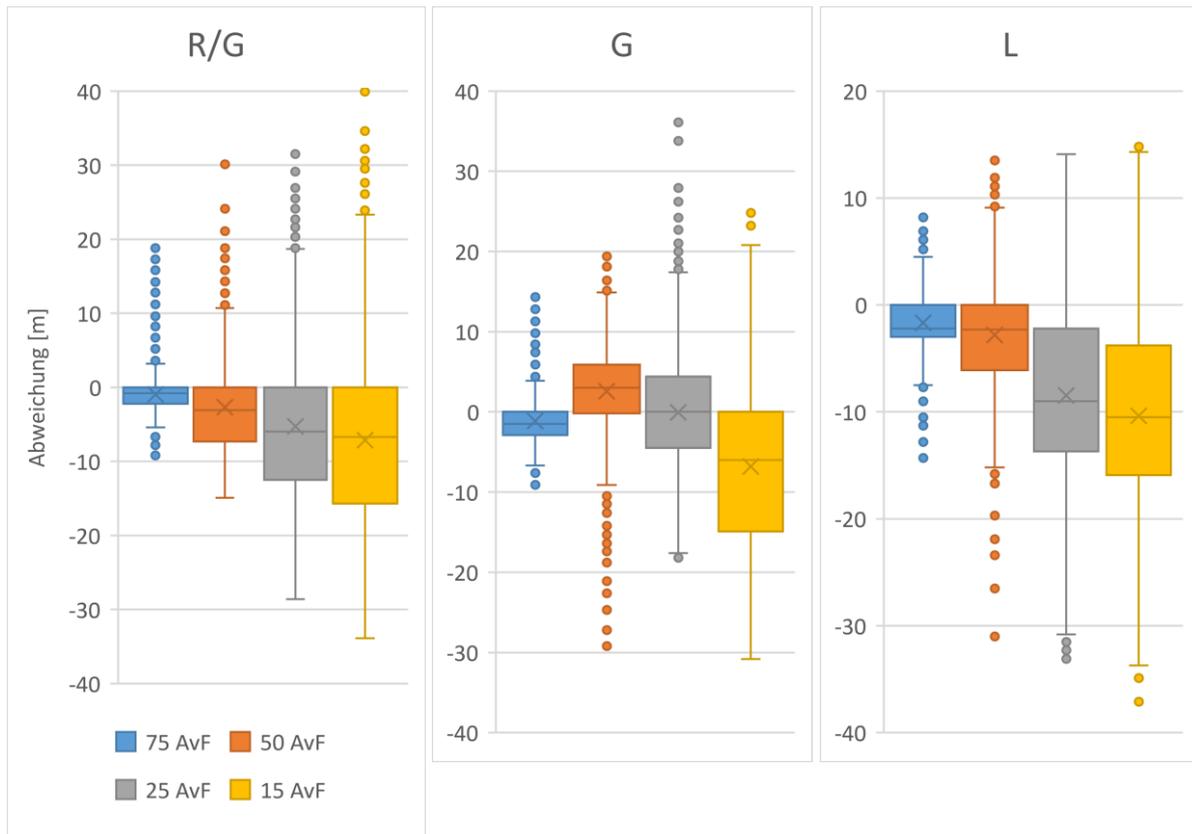


Abbildung 60: Max. Staulänge Leonhardplatz S-N R/G, G, L

Max: 62,6 m \varnothing 37,7 m

Max: 50,5 m \varnothing 31,0 m

Max: 44,6 m \varnothing 22,0 m

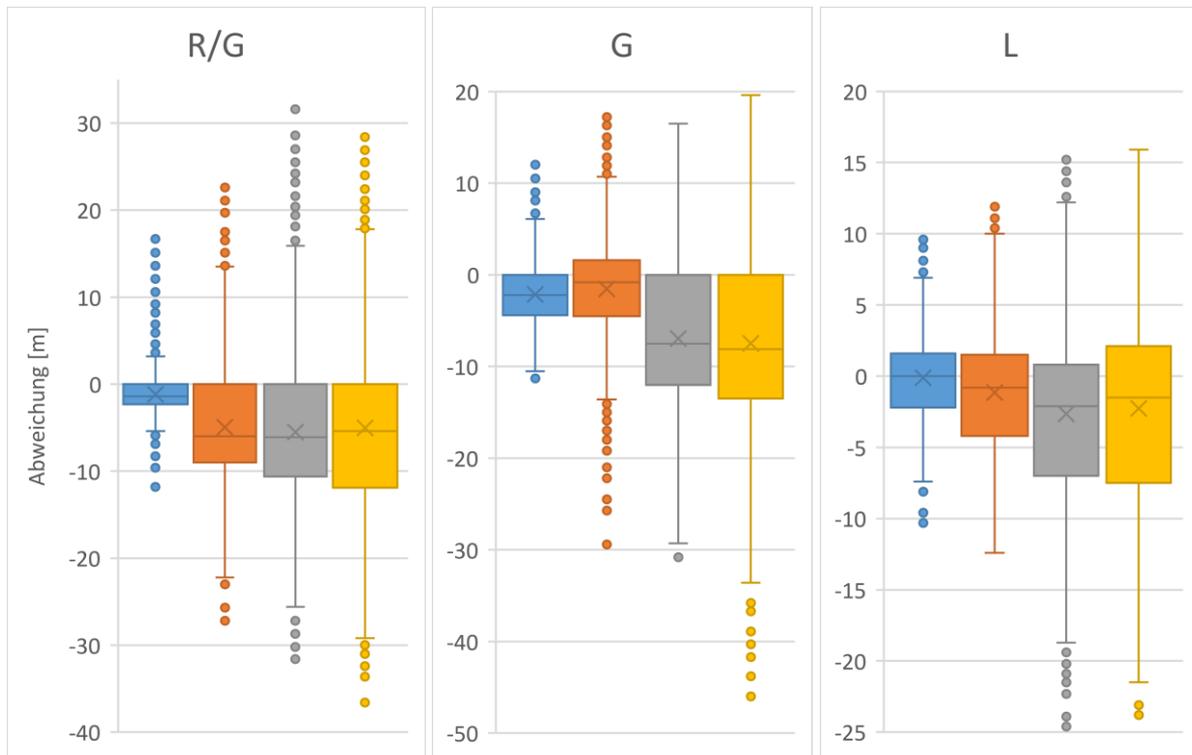


Abbildung 61: Max. Staulänge Willy-Brandt-Platz R/G, G, L

Max: 51,9 m Ø 22,9 m

Max: 49,0 m Ø 20,5 m

Max: 20,6 m Ø 11,3 m

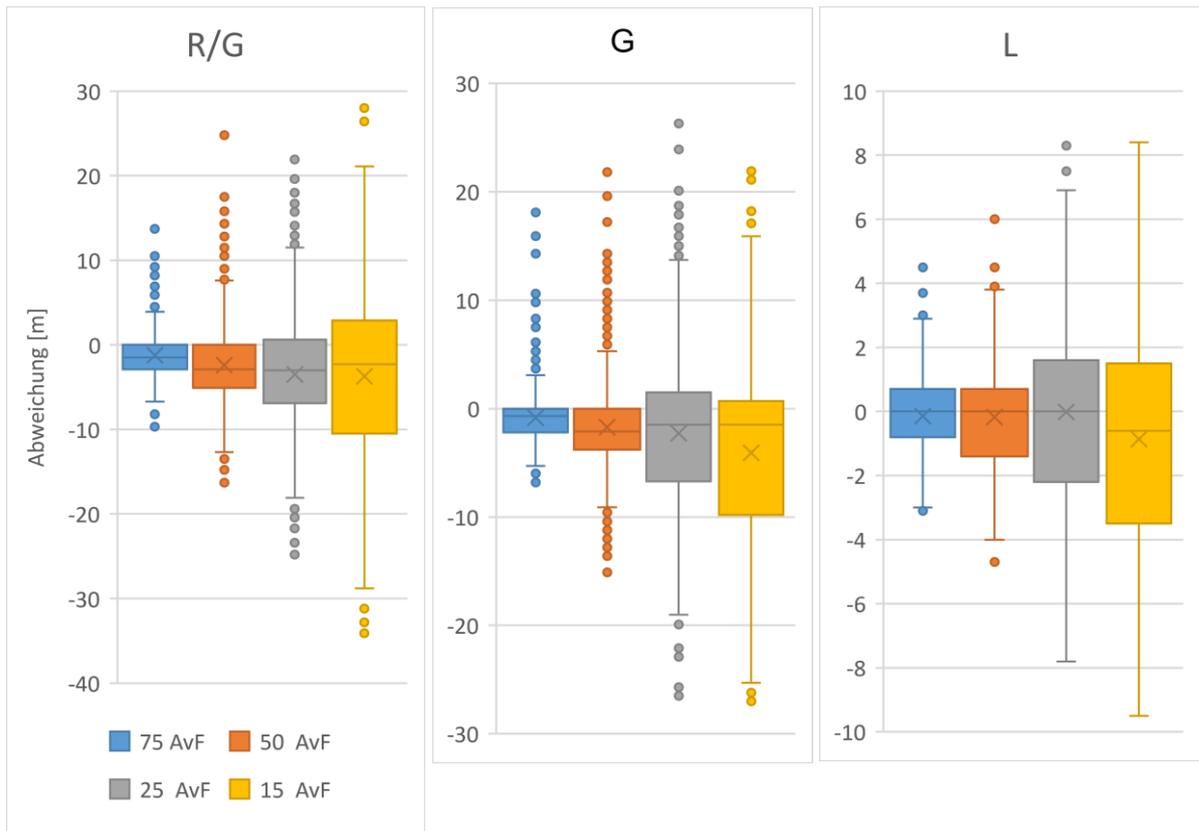


Abbildung 62: Max. Staulänge Leonhardplatz N-S R/G, G, L

Max: 13,6m Ø 8,5m

Max: 44,6m Ø 28,9m

Max: 37,9m Ø 25,1m

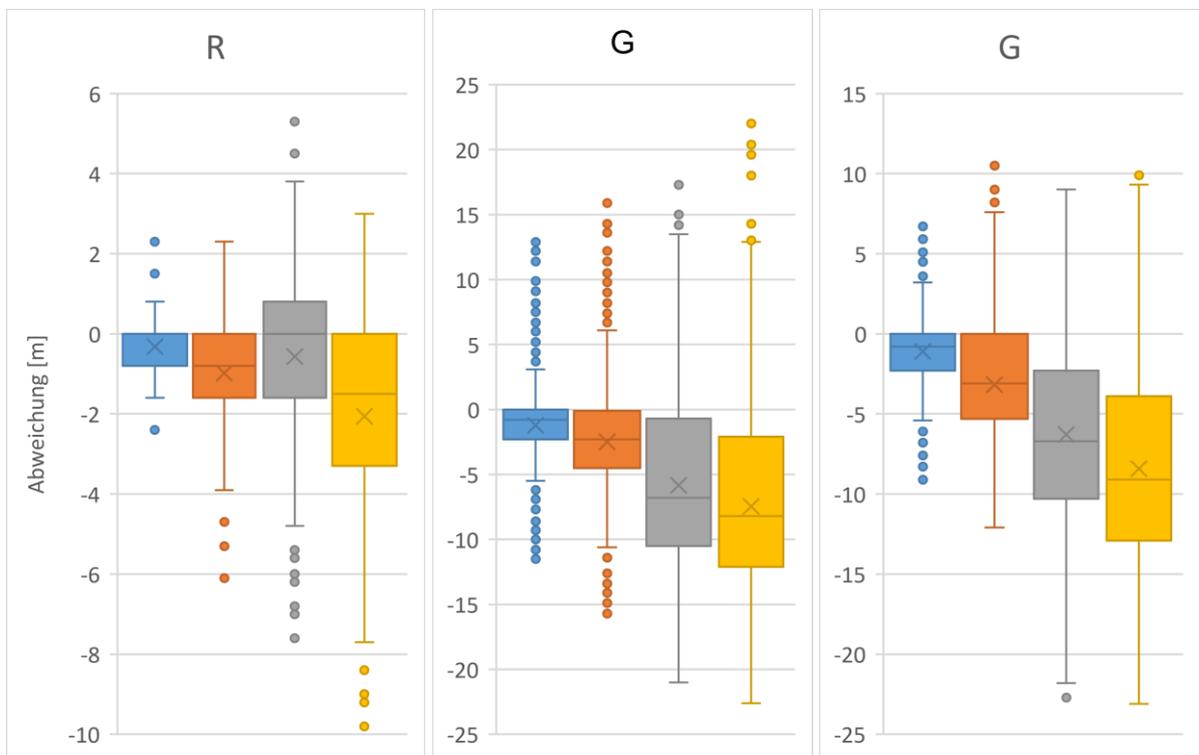


Abbildung 63: Max. Staulänge Altewiekring R, G, G

8.6.2 Auswertung der Ankunftsverfahren (BS)

Einige Fahrstreifen weisen ähnliche Ergebnisse/Ausprägungen der simulierten Ankunftsverfahren auf. Somit werden einige Fahrstreifen in der Auswertung kategorisiert und zusammen beschrieben und ausgewertet.

8.6.2.1 Linksabbieger (mit vorhandener Abflussdetektion):

Verkehrssituation:

Auf beiden Linksabbieger-Fahrstreifen (Willy-Brandt-Platz L, Leonhardplatz N-S L) kommt es gelegentlich zu Aufstauungen von Fahrzeugen vor der LSA. In diesem Fall müssen Fahrzeuge länger als einen Umlauf vor der LSA warten.

Ankunft 1:

Der Median der Abweichungen des Ankunft1-Verfahrens liegt bei allen AvF im negativen Bereich. Daher wird die Ankunft an Fahrzeugen (hier von Ankunft 1) generell unterschätzt. Mit sinkender AvF ist zu erkennen, dass die Unterschätzung zunimmt. Für beide Fahrstreifen besitzen die Boxplots der Abweichung bei 100 AvF bis 50 AvF ähnliche Spannweiten. Bei einer 25 AvF und 15 AvF steigt mit sinkendem AvF die Unterschätzung der Ankunft signifikant an. Diese Signifikanz ist ebenfalls in der Auswertung 8.7.1 der Staulänge der Fahrstreifen zu erkennen. Daher ist bis minimal 50 AvF mit Ankunft 1 nur eine unterschätzte Grundverkehrsbelastung zu bestimmen, in der keine Verkehrsbelastungsspitzen detektiert werden.

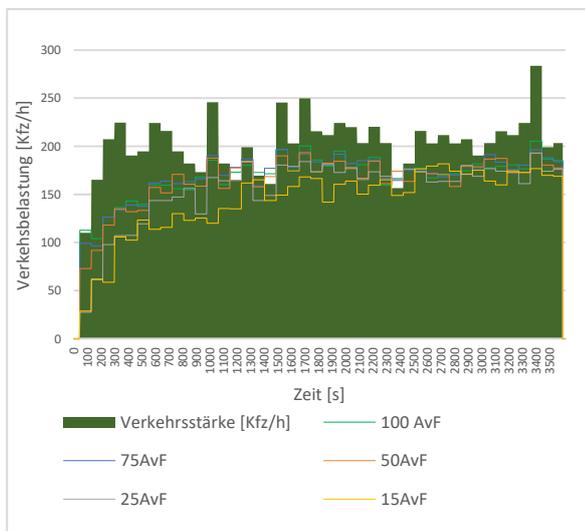


Abb.64: Willy-Brandt-Platz L A1

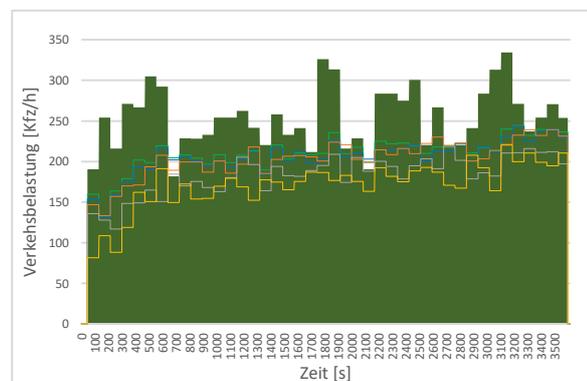


Abb. 65: Leonhardplatz N-S L A1

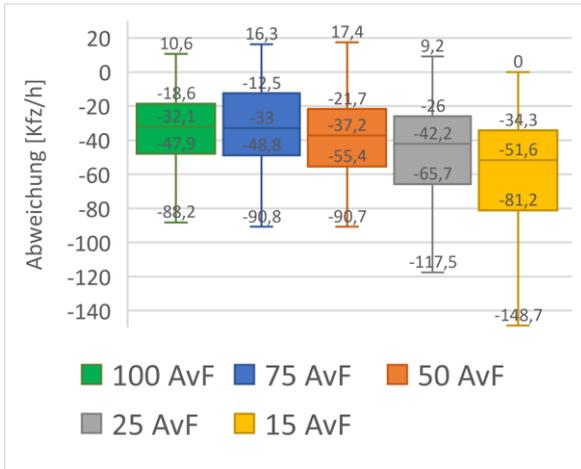


Abb. 66: Willy-Brandt-Platz L Ab. A1

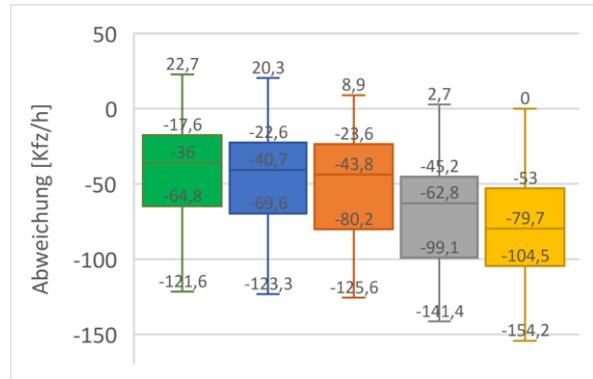


Abb. 67: Leonhardplatz N-S L Ab. A1

Abfluss:

In Abbildung 68 und Abb. 69 wird für jeden Umlauf dargestellt, in wie vielen Simulationen der insgesamt 10 Simulationen, je AvF eine Abflussbestimmung stattgefunden hat.

Für Fahrstreifen Willy-Brandt-Platz L gilt, dass es pro Umlauf jeweils nur überwiegend in zwei von 10 Simulationen zu einer Abflussbestimmung kommt, unabhängig von der AvF (Spanne 100 AvF bis 15 AvF). Für Leonhardplatz N-S L werden häufig Abflüsse bestimmt. In beiden Abbildungen wird deutlich, dass mit geringer werdender AvF auch die Anzahl an Abflussbestimmungen abnimmt.

Die Schlussfolgerung daraus ist, dass es nicht in jedem LSA-Umlauf zu mindestens einer Abflussbestimmung kommt. Da die Belastung und die daraus resultierende Aufstauung zu gering ist, liegen dadurch nicht immer Informationen über den aktuellen Abfluss vor.

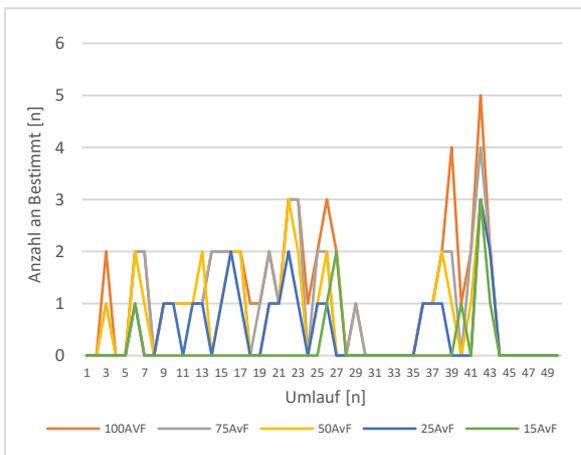


Abb. 68: Willy-Brandt-Platz L Abfluss A1

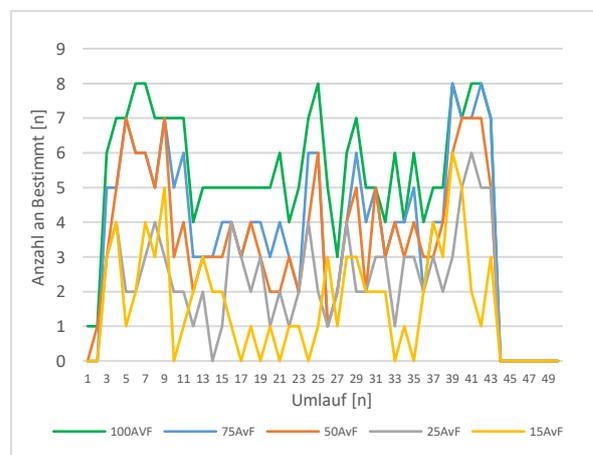


Abb. 69: Leonhardplatz N-S L Abfluss A1

Ankunft 2:

Die ankommenden Fahrzeuge werden mit Ankunft 2 hier generell unterschätzt bestimmt. Der Median der Abweichungen liegt dabei für alle AvF im negativen Bereich. Mit abnehmendem AvF steigt die Unterschätzung der ankommenden Fahrzeuge. Für den Fahrstreifen Willy-Brandt-Platz L kann hier der qualitative Verlauf der Verkehrsbelastung bis minimal 50 AvF mit einer zunehmenden Unterschätzung der Ankunft bei sinkendem AvF abgebildet werden. Für Leonhardplatz N-S erfolgt L hier ebenfalls bis zu einer minimal 50prozentigen AvF eine qualitative Abbildung der Verkehrsbelastung, jedoch mit einer leichteren zunehmenden Unterschätzung der Ankunft bei sinkender AvF als bei dem Fahrstreifen Willy-Brandt-Platz L.

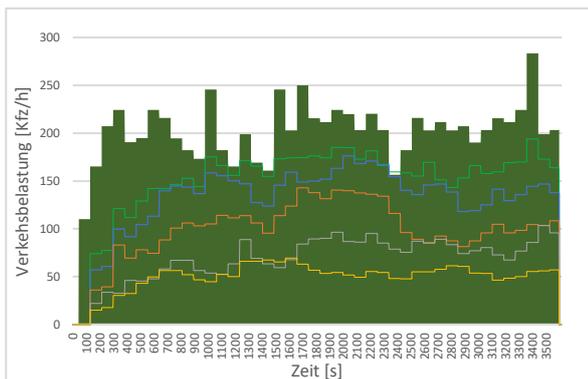


Abb. 70: Willy-Brandt-Platz L A2

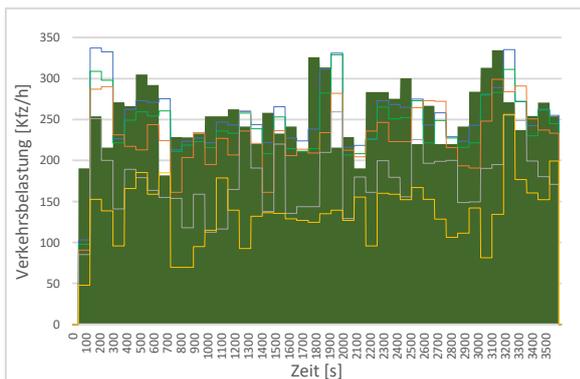


Abb. 71: Leonhardplatz N-S L A2

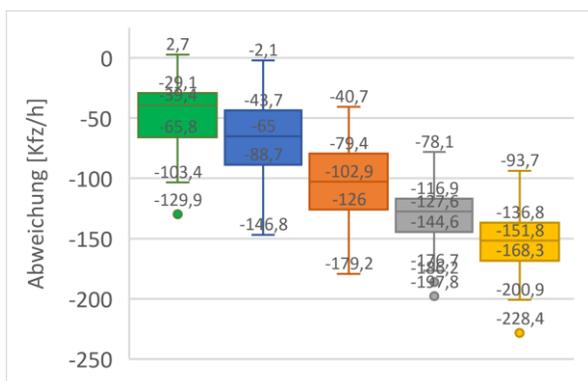


Abb. 72: Willy-Brandt-Platz L Ab. A2

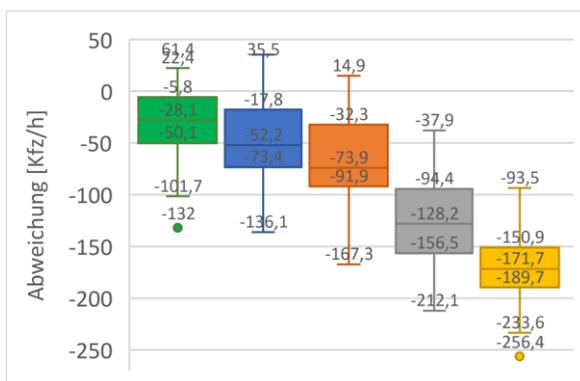


Abb. 73: Leonhardplatz N-S L Ab. A2

Ankunft 3:

Die Bestimmung der ankommenden Fahrzeuge bei 100 AvF mit dem Ankunft 3 Verfahren startet mit einem Median der Abweichung nahe 0 (-7,9 kfz/h; -8,2 kfz/h). Dies bedeutet eine relativ genaue Bestimmung der Ankunft. Für Willy-Brandt-Platz L weisen die Abweichungen bei 100 AvF bis 25 AvF eine ähnliche Spannweite/Streuung auf. Für diese ähnlichen Spannweiten erfolgt eine relativ gute Darstellung des qualitativen Verlaufs der Ankunft. Auch hier geht eine geringere AvF mit einer steigenden Unterschätzung der Werte einher. Ankunft 3 gibt für den Fahrstreifen Leonhardplatz N-S L mit minimal 50 AvF die Grundverkehrsbelastung wieder, jedoch ohne Berücksichtigung von Verkehrsbelastungsspitzen.

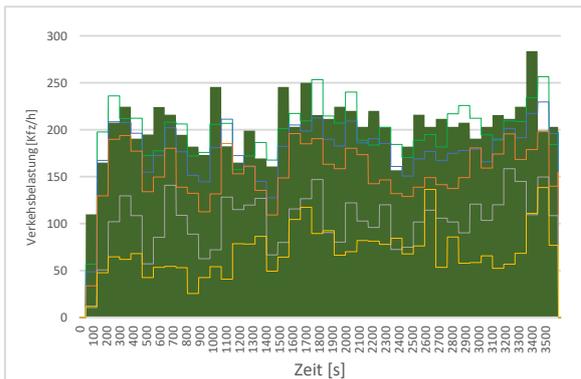


Abb. 74: Willy-Brandt-Platz L A3

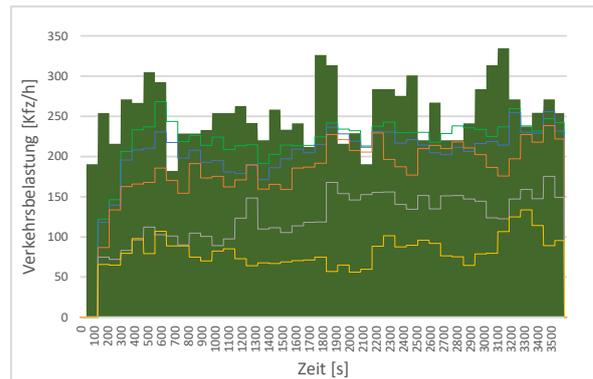


Abb. 75: Leonhardplatz N-S L A3

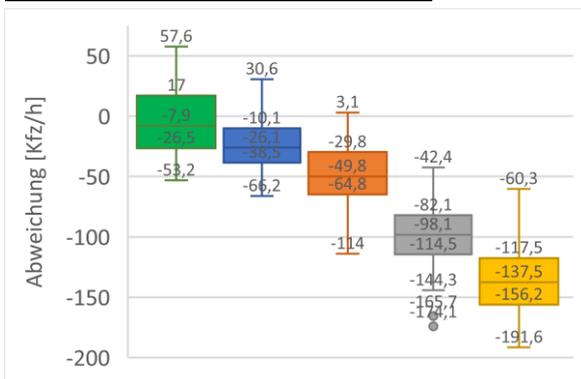


Abb. 76: Willy-Brandt-Platz L Ab. A3

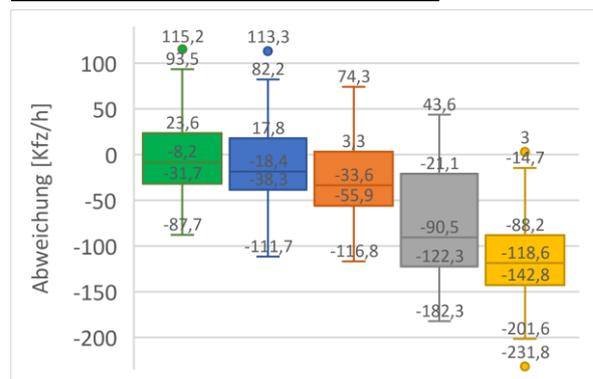


Abb. 77: Leonhardplatz N-S L Ab. A3

8.6.2.2 Linksabbiegerfahrstreifen:

Verkehrssituation:

Während der Rotzeit der LSA weist der Fahrstreifen Leonhardplatz S-N L nur eine geringe Aufstauung von Fahrzeugen auf.

Ankunft 1:

Ankunft 1 überschätzt die Ankunft stark, hervorgerufen durch die Abflussschätzung. Hier ist die Schätzung des Abflusses über die Freigabezeit zu hoch. Gut zu erkennen ist, dass die Schwankungen der erfassten Verkehrsbelastung bei 100 AvF bis 50 AvF von der Staulängenbestimmung hervorgerufen werden, da sie mit sinkender AvF kleiner werden (die Frequenz Staulängen Bestimmung nimmt mit abnehmender AvF ab, aus 7.2.2)

Für Ankunft 1 erfolgt lediglich eine einzige Abflussbestimmung innerhalb von 10 Simulationen in einen einzigen Umlauf bei 100 AvF bis 25 AvF. Hier kann mit Ankunft 1 die Verkehrsbelastung nicht abgebildet werden.

Ankunft 2:

Ankunft 2 bildet bei 100 AvF bis 75 AvF den Verlauf der Verkehrsbelastung qualitativ unterschätzt ab mit einer stark geglätteten Detektion von Verkehrsbelastungsspitzen. Mit abnehmender AvF wird die Ankunft zunehmend unterschätzt. Bei 50AvF bis 15AvF werden keine deutbaren Werte widergegeben.

Ankunft 3:

Ankunft 3 bildet bei 100 AvF die ankommenden Fahrzeuge leicht unterschätzt ab. Bei 100 AvF bis 15 AvF weisen die Boxplots der Abweichungen ähnliche Ausprägungen auf. Bei den gesamten AvF ist ein qualitativer Verlauf der Verkehrsbelastung ablesbar. Dieser qualitative Verlauf wird jedoch mit sinkender AvF zunehmend unterschätzt erfasst. Die Nachfragespitzen werden mit sinkender AvF zunehmend geglättet bestimmt.

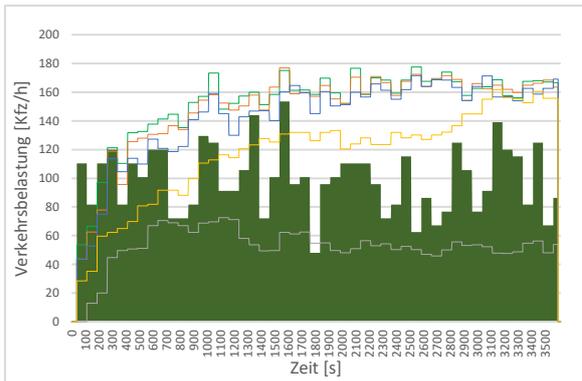


Abb. 78: Leonhardplatz S-N L A1

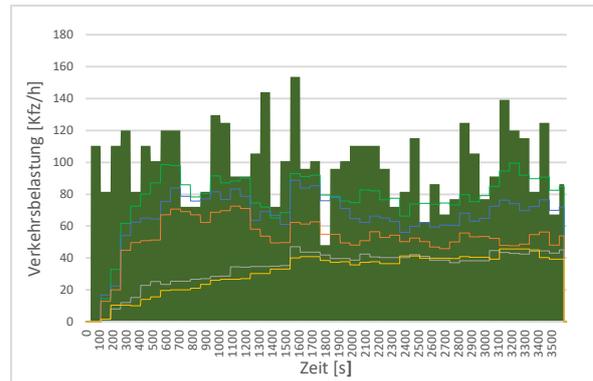


Abb. 79: Leonhardplatz S-N L A2

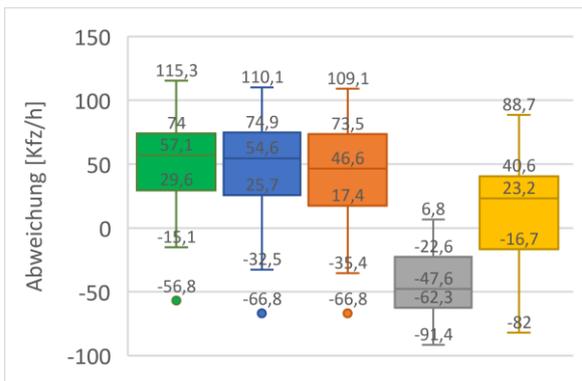


Abb. 80: Leonhardplatz S-N L Ab. A1

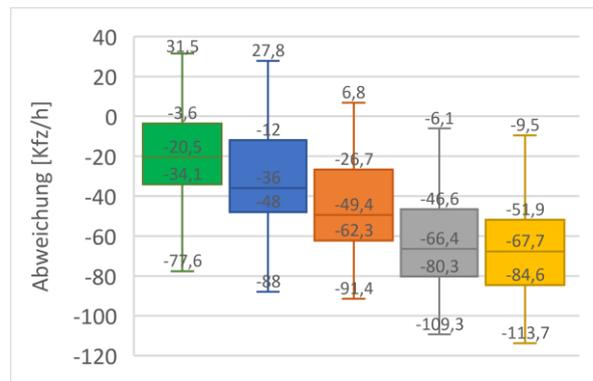


Abb. 81: Leonhardplatz S-N L Ab. A2

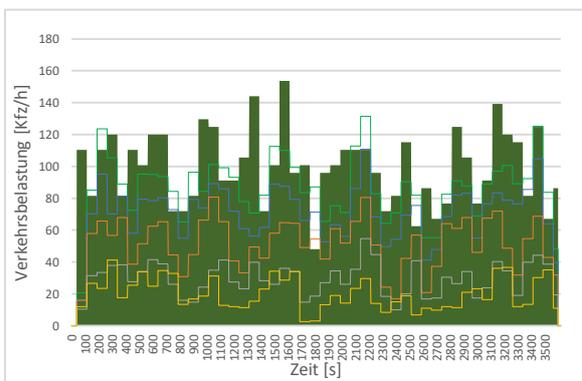


Abb. 82: Leonhardplatz S-N L A3

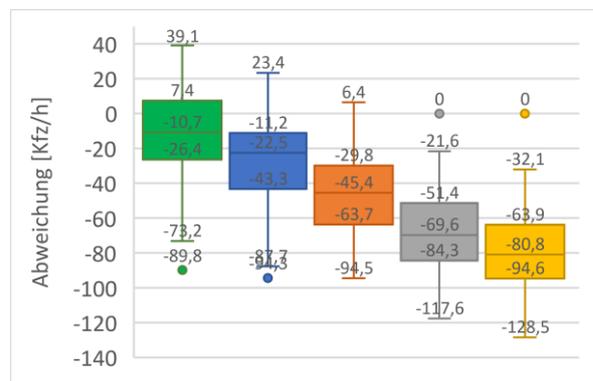


Abb. 83: Leonhardplatz S-N L A3

8.6.2.3 Rechtsabbiegerfahrstreifen

Verkehrssituation:

Auf dem Rechtsabbiegerfahrstreifen (Altewiekring R) herrscht eine sehr geringe Verkehrsbelastung (\emptyset 67 Kfz/h). Hinzu kommt, dass der Rechtsabbiegerfahrstreifen gemeinsam mit dem Hauptverkehrsstrom Geradeaus signalisiert wird (die gleiche Signalgruppe) und folglich eine sehr lange Freigabezeit in Bezug auf seine geringe Verkehrsstärke besitzt. Dies wiederum führt zu einer niedrigen Aufstauung von Fahrzeugen während der Rotzeit. Während der Freigabezeit passieren viele Fahrzeuge ohne einen Halt die Haltelinie der LSA.

Ankunft 1:

Mit Ankunft 1 kommt es hier zu einer deutlich überhöhten Schätzung der ankommenden Fahrzeuge. Dieses liegt daran, dass aufgrund der niedrigen Verkehrsbelastung der Abfluss geschätzt wird. Aus der langen Freigabe resultiert der hohe Abfluss, welcher wiederum für Ankunft 1 verwendet wird. Dies zusammen führt zur deutlichen Überschätzung der ankommenden Fahrzeuge und zu keinen verwertbaren Werten.

Ankunft 2:

Die ankommenden Fahrzeuge werden mit Ankunft 2 deutlich unterschätzt bestimmt. Die Voraussetzung für das Verfahren Ankunft 2 besteht darin, dass Fahrzeuge möglichst zwei Umläufe vor der LSA verweilen. Diese Situation ist hier nicht gegeben. Es werden keine verwertbaren Werte bestimmt.

Ankunft 3:

Für Ankunft 3 fängt die Abweichung der bestimmten Werte bei 100 AvF mit einem Median nahe 0 an (-5,9 kfz/h). Daraus resultiert eine passable Schätzung der ankommenden Fahrzeuge. Mit sinkender AvF steigt die Unterschätzung der ankommenden Fahrzeuge. Bei allen AvF nehmen die Intervalle der Spannweite sowie die Interquartilsabstände der Abweichung ähnliche Werte an. Mit sinkender AvF wird der Median zunehmend negativer. Dies zeugt von einer Bestimmung des qualitativen Verlaufes der Ankunft mit zunehmender Unterschätzung der Werte bei sinkender AvF. Die Verkehrsbelastungsspitzen werden mit sinkender AvF zunehmend geglättet bestimmt. Bis minimal 25 AvF kann ein qualitativer Verlauf der Verkehrsbelastung mit Ankunft 3 noch bestimmt werden. Niedrigerer AvF liefern keine verwertbaren Daten.

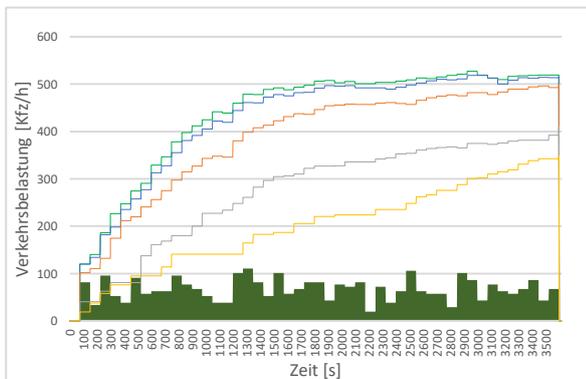


Abb. 84: Altewiekring R A1

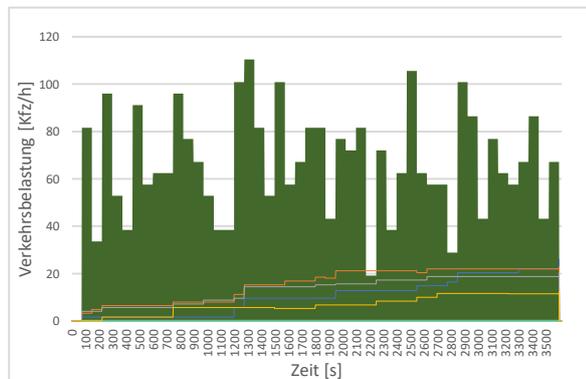


Abb. 85: Altewiekring R A2

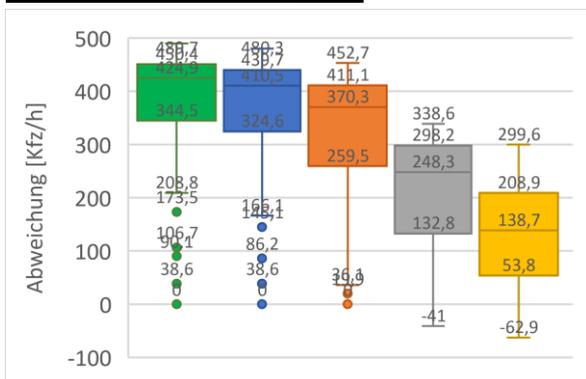


Abb. 86: Altewiekring R Ab. A1

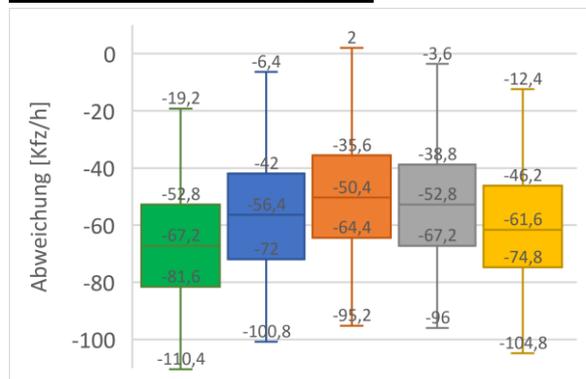


Abb. 87: Altewiekring R Ab. A2

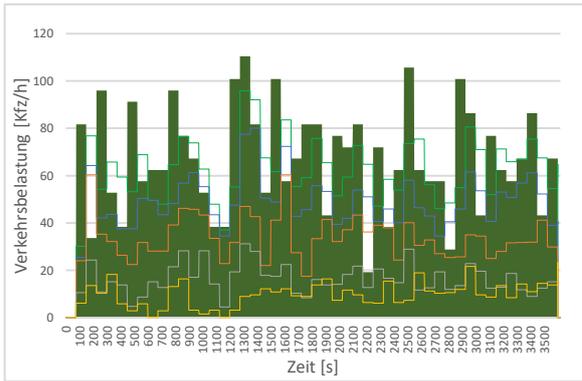


Abb. 88: Altewiekring R A3

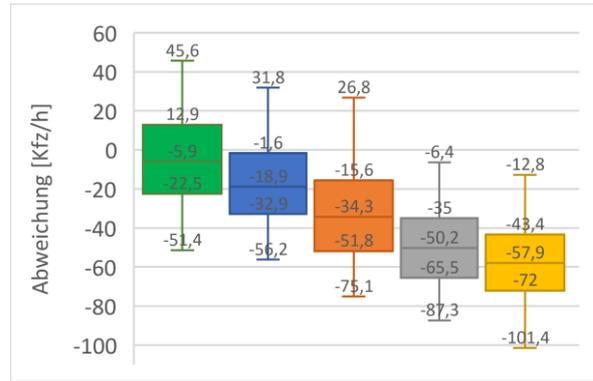


Abb. 89: Altewiekring R Ab. A3

8.6.2.4 Fahrstreifen Rechts/Geradeaus, Geradeaus mit wenigen Fahrstreifenwechseln

Verkehrssituation:

Hier werden die Ankunftswerte von jeweils zwei Fahrstreifen (Geradeaus/Rechts und Geradeaus) gemeinsam ausgewertet (Kapitel 8.3). Innerhalb der zwei Fahrstreifen finden nur wenige Fahrstreifenwechsel statt. Das bedeutet, die Mehrzahl der Fahrzeuge entscheidet sich bereits vor der Fahrbahnaufweitung für den richtigen (freien) Fahrstreifen, sodass danach kein Fahrstreifenwechsel mehr stattfinden muss. Vereinzelt Fahrstreifenwechsel gibt es jedoch, wenn ein Fahrzeug auf ein Stauende trifft und nach einem Halt erneut anfährt und darauffolgend den Fahrstreifen wechselt.

Ankunft 1:

Die Ankunft von Fahrzeugen wird für Leonhardplatz N-S R/G, G und für Leonhardplatz S-N R/G, G wird mit Ankunft 1 überschätzt und unterschätzt bestimmt. Dies liegt daran, dass kein Abfluss detektiert wird und somit die Schätzung des Abflusses aus Kapitel 8.4 vorgenommen wird. In diesem Fall ist die Abflussannahme/-schätzung für Leonhardplatz N-S R/G, G zu niedrig und für Leonhardplatz S-N R/G, G deutlich zu hoch. Eine Optimierung könnte mittels einer Verarbeitung von historischen Daten erzielt werden. Das gleiche gilt für die Boxplots bei einer 100AvF bis 50AvF. Hier erfolgt eine zu niedrige Schätzung für Leonhardplatz N-S R/G, G und eine zu hohe Schätzung bei Leonhardplatz S-N R/G, G. Die Boxplots der Abweichung von Ankunft1 bei einer 100AvF bis 50AvF weisen ähnliche Mediane, Spannweiten sowie Interquartilsabstände der Abweichung auf. Zu erkennen ist, dass Ankunft 1 hier für beide Strecken Leonhardplatz N-S R/G, G und Leonhardplatz S-N R/G, G mit allen AvF den qualitativen Verlauf stark geglättet wiedergibt. Spitzen der Verkehrsbelastung werden somit stark geglättet registriert. Die Erkennung von Verkehrsspitzen findet hier auf Grundlage der Staulängenbestimmung statt. Zu dieser Schlussfolgerung gelangt man, da sich die Berechnung der Ankunftsbestimmung aus zwei Staulängen (alter Stau sowie die zurückliegende Staulänge) und dem Abfluss zusammensetzt. In der Simulation der beiden Fahrstreifen findet keine Abflussbestimmung statt, sodass Ankunft 1 nur von der Staulängenbestimmung beeinflusst wird. Auch hier steigt mit einer sinkender AvF die Unterschätzung der ankommenden Fahrzeuge leicht. Somit können bis minimal 15AvF mit Ankunft 1 Veränderungen im Verkehrsablauf festgestellt werden.

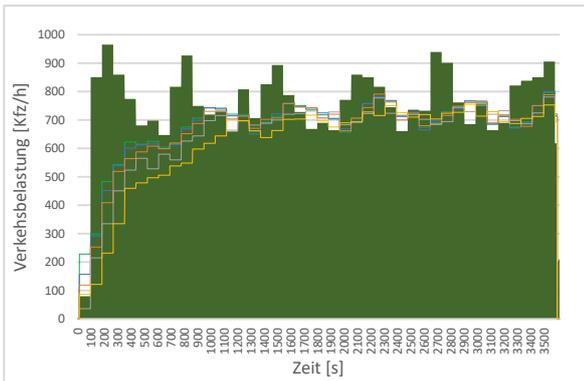


Abb. 90: Leonhardplatz N-S R/G, G A1

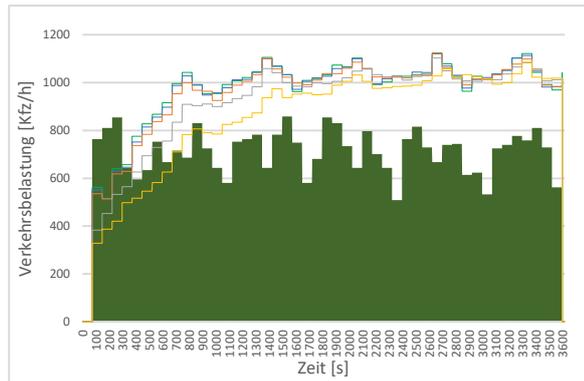


Abb. 91: Leonhardplatz S-N R/G, G A1

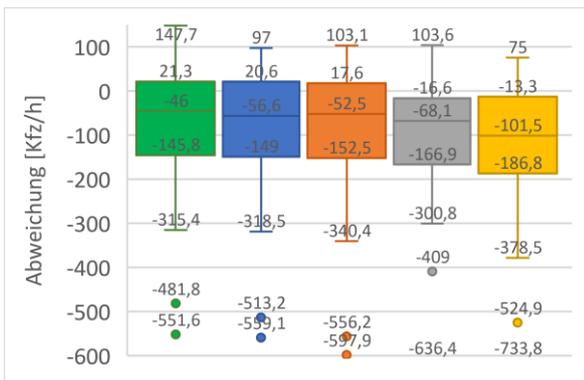


Abb. 92: Leonhardplatz N-S R/G, G Ab. A1

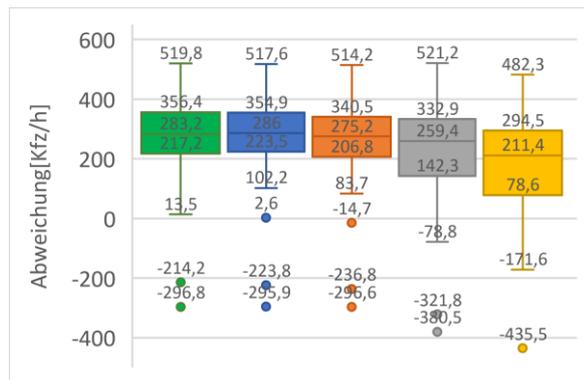


Abb. 93: Leonhardplatz S-N R/G, G Ab. A1

Ankunft 2:

Mit dem Ankunft 2 Verfahren erfolgt eine deutliche zu geringe Bestimmung der Ankunft, bedingt durch die zu geringen Wartezeiten vor der LSA. Verkehrsspitzen werden bei Leonhardplatz N-S R/G, G bei einer 100 AvF bis 75 AvF zeitlich verspätet und sowie stark geglättet abgebildet. Das Gleiche gilt für Leonhardplatz S-N R/G, G, jedoch bei einer 100 AvF bis 50 AvF. Hier können bei allen AvF mit Ankunft2 keine aktuellen bzw. deutbaren Daten erhoben werden.

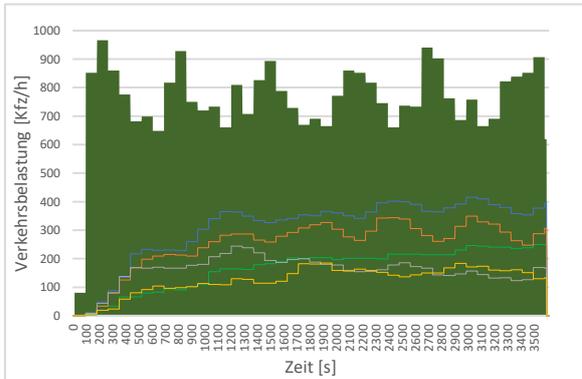


Abb. 94: Leonhardplatz N-S R/G, G A2

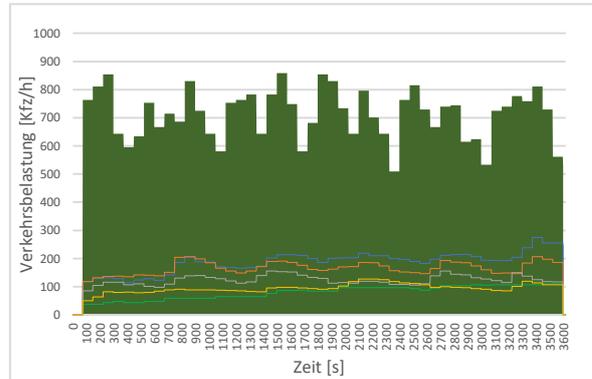


Abb. 95: Leonhardplatz S-N R/G, G A2

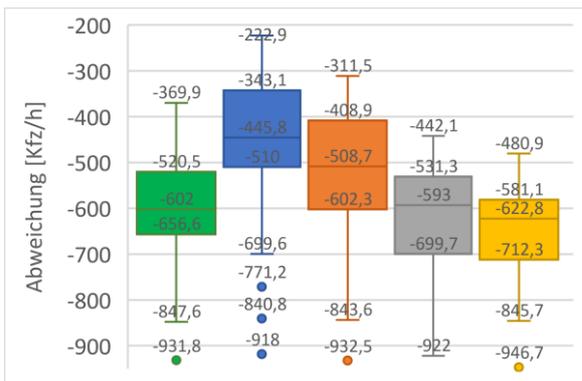


Abb. 96: Leonhardplatz N-S R/G, G Ab. A2

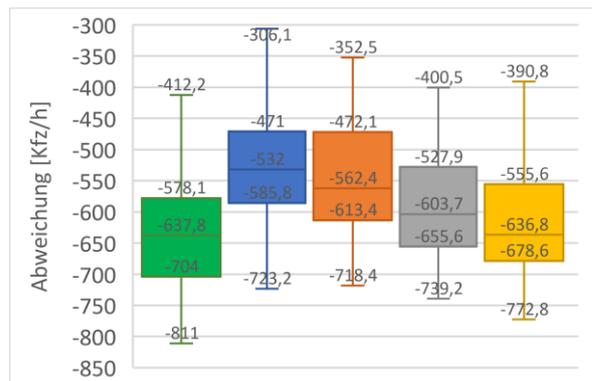


Abb. 97: Leonhardplatz S-N R/G, G Ab. A2

Ankunft 3:

Die Boxplots, die die Abweichungen von Ankunft 3 unter Verwendung verschiedener Ausstattungsraten angeben, weisen alle ähnliche Spannweiten der Abweichung auf. Mit einer sinkender AvF steigt auch hier die Unterschätzung der ankommenden Fahrzeuge. Mit 100 AvF wird die Verkehrsbelastung sehr gut wiedergegeben. Erkennbar ist, dass sogar bei einer 100 AvF bis 15 AvF ein qualitativer Verlauf der Verkehrsbelastungsspitzen mit Ankunft 3 abgebildet werden kann. Die Ankunft wird jedoch mit sinkender AvF zunehmend unterschätzt und Spitzen werden zusammengefasst abgebildet. Die qualitative Abbildung findet für Leonardplatz N-S R/G,G leichtverspätet statt.

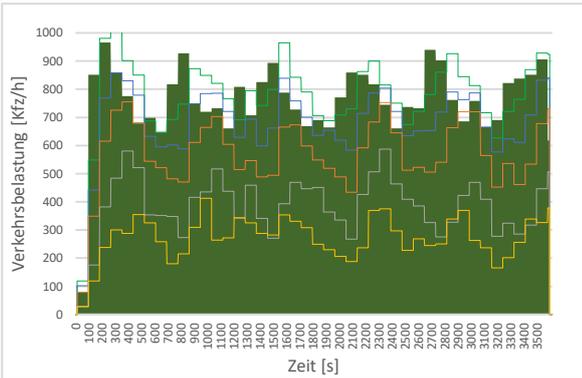


Abb. 98: Leonardplatz N-S R/G, G A3

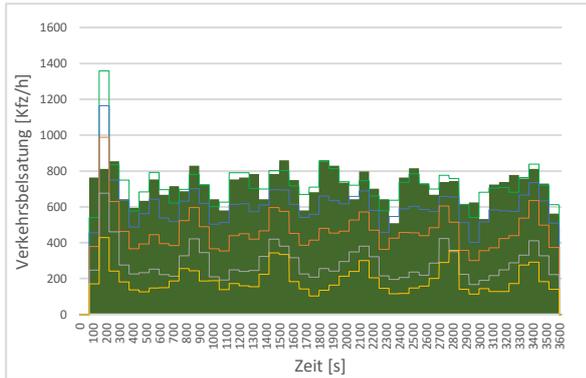


Abb. 99: Leonardplatz S-N R/G, G A3

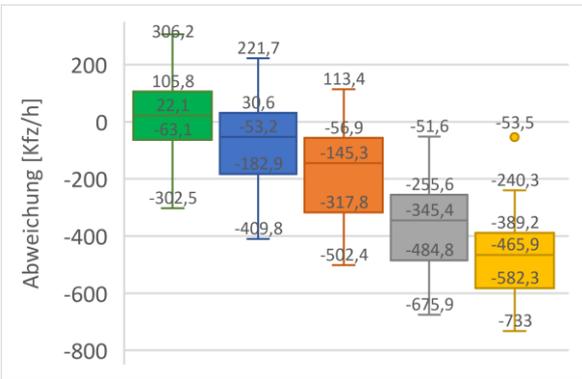


Abb. 100: Leonardplatz N-S R/G, G Ab. A3

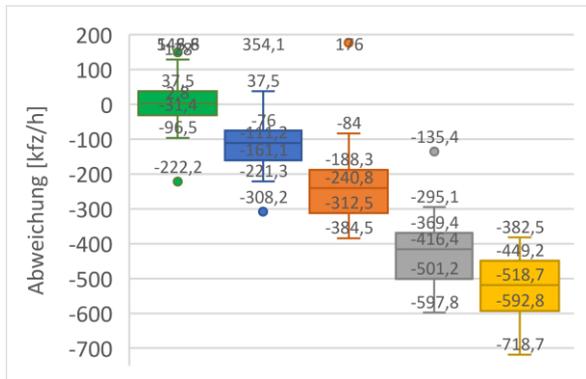


Abb. 101: Leonardplatz S-N R/G, G Ab. A3

8.6.2.5 Fahrstreifen Rechts/Geradeaus, Geradeaus mit vielen Fahrstreifenwechseln

Verkehrssituation:

Die Auswertung der Ankunftsverfahren für die beiden Fahrstreifen Geradeaus und Geradeaus/Rechts erfolgt hier gemeinsam. Die Häufigkeit der Fahrstreifenwechsel ist bedingt durch Wechsel aus einer Aufstauung heraus und ausgehend vom Stauende, um von dem rechten auf den linken Fahrstreifen zu wechseln.

Ankunft 1:

Die Werte, die mit Ankunft 1 bestimmt werden, befinden sich für alle AvFs auf einem Level. Die Ankunft 1 hängt auch hier stark von der Abflussschätzung ab. Für Altewiekring G, G ist diese zu hoch und für Willy-Brandt-Platz R/G, G eher zu niedrig. Die sinkende Ausstattungsrate an vernetzten Fahrzeugen hat hier keinen großen Einfluss auf die Ankunftsbestimmung. Die erhobene Anzahl der ankommenden Fahrzeuge verringert sich leicht bei sinkender AvF. Es kommt für beide Fahrstreifen jedoch nicht zu einer genauen Abbildung der Verkehrsbelastung.

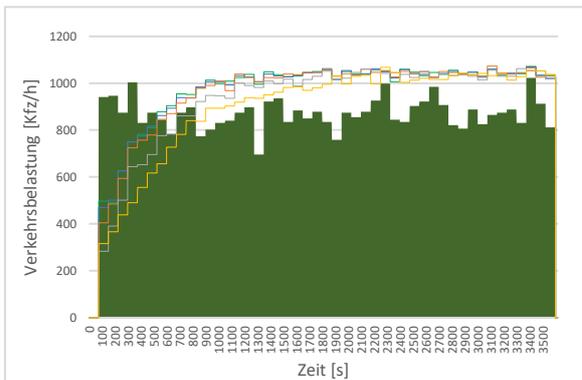


Abb. 102: Altewiekring G, G A1

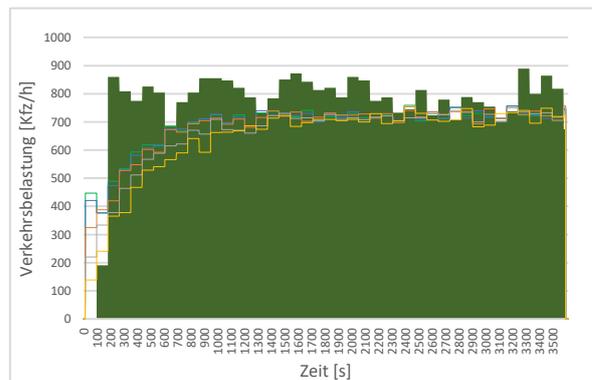


Abb. 103: Willy-Brandt-Platz R/G, G A1

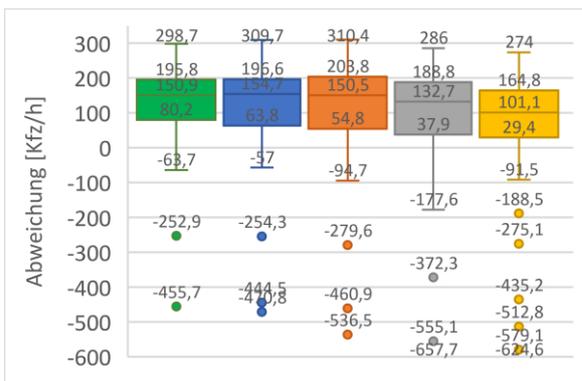


Abb. 104: Altewiekring G, G Ab. A1

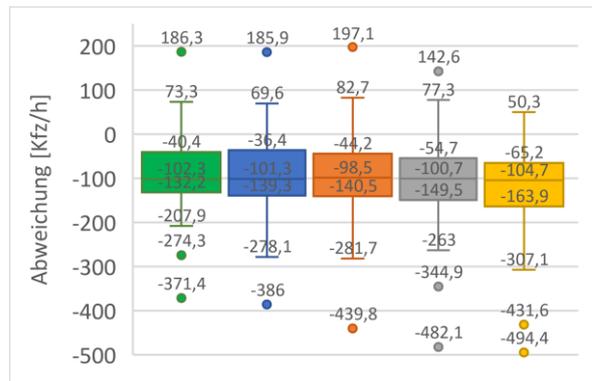


Abb. 105: Willy-Brandt-Platz R/G, G Ab. A1

Ankunft 2:

Mit Ankunft 2 werden hier die ankommenden Fahrzeuge sehr stark unterschätzt, da kein Fahrzeug länger als zwei Umläufe vor der LSA warten muss. Eine qualitative Abbildung der Verkehrsbelastung ist hier nicht zu erkennen.

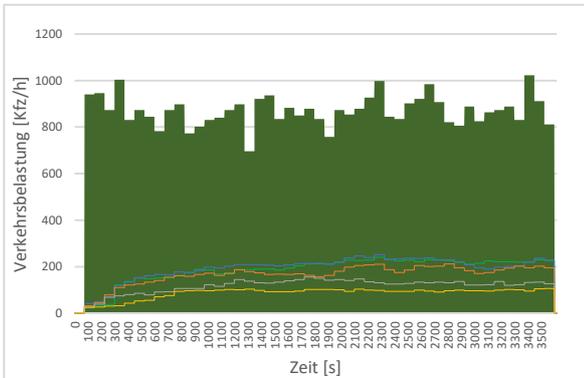


Abb. 106: Altewiekring G, G A2

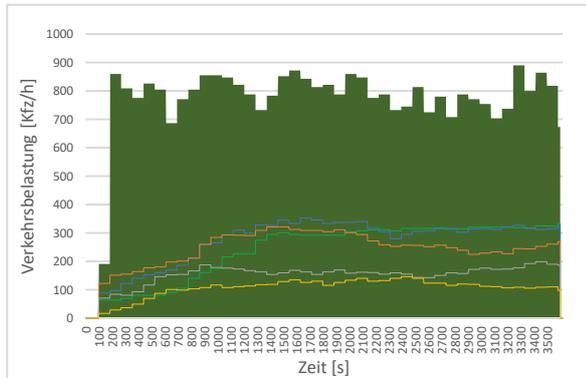


Abb. 107: Willy-Brandt-Platz R/G, G A2

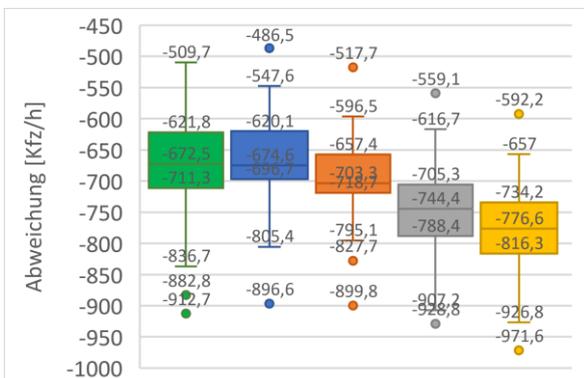


Abb. 108: Altewiekring G, G Ab. A2

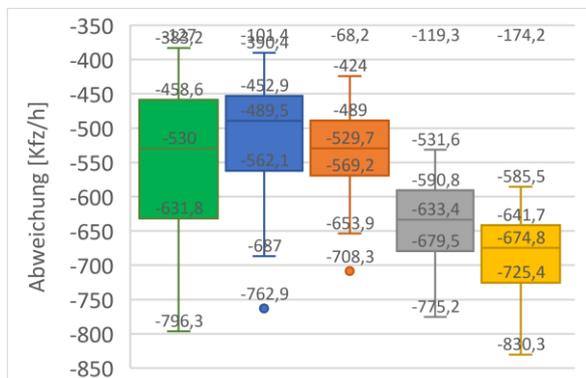


Abb. 109: Willy-Brandt-Platz R/G, G Ab. A2

Ankunft 3:

Ankunft 3 führt hier mit einer 100 AvF zu einer Überschätzung der ankommenden Fahrzeuge. Mit geringer werdender AvF nimmt die Überschätzung ab, bis hin zu einer Unterschätzung der Ankunft bei einer 25 AvF oder 15 AvF. Die Überschätzung resultiert ggfs. aus einer nicht zu 100% erfolgreichen arbeitenden Anpassung des Ankunft 3 Verfahrens (Kapitel 8.5), sodass Fahrzeuge auf beiden Fahrstreifen doppelt erhoben werden. Die Spannweite und der Interquartilsabstand sowie die zentrale Lage des Medians im Boxplot der Abweichungen ist bei allen AvF ähnlich. Lediglich bei sinkender AvF nimmt der Median der Abweichung zunehmend geringere Werte an. Ein qualitativer Verlauf ist bei einer 100 AvF bis 25 AvF ablesbar.(für Altewiekring G, G relativ genau) Für Willy-Brandt-Platz R/G, G wird der qualitative Verlauf sehr überspitzt bis minimal 25 AvF abgebildet.

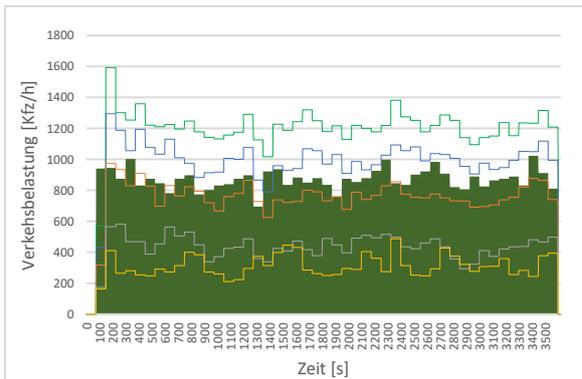


Abb. 110: Altewiekring G, G A3

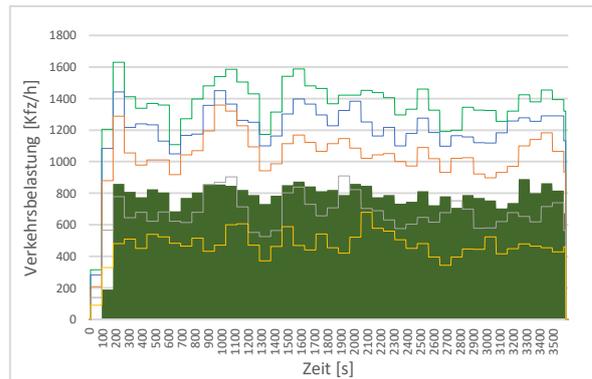


Abb. 111: Willy-Brandt-Platz R/G, G A3

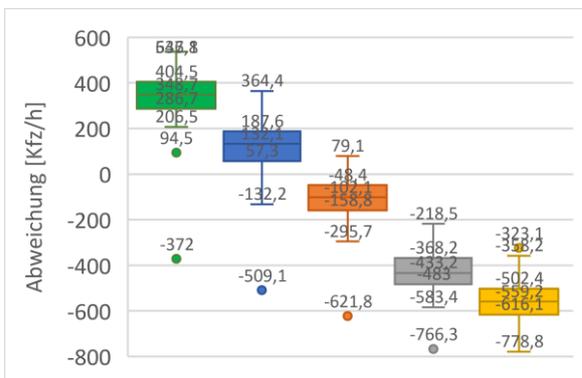


Abb. 112: Altewiekring G, G Ab. A3

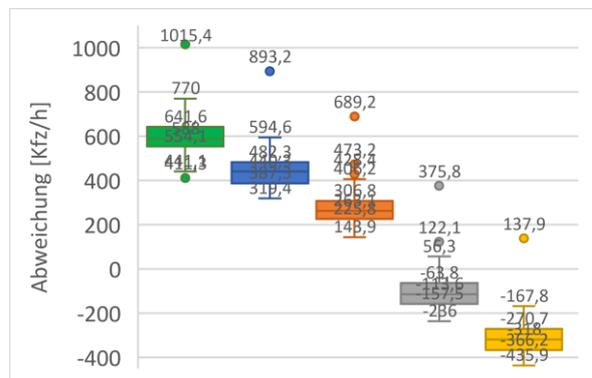


Abb. 113: Willy-Brandt-Platz R/G, G Ab. A3

8.6.3 Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar

Wie in Kapitel 6.2.5.1 beschrieben, wird die Anzahl von Fahrzeugen auf einem Fahrstreifen einer Strecke über eine aktuell erhobene Staulänge sowie über das fahrzeugseitige Radar von vernetzten Fahrzeugen bestimmt. Eine Bestimmung der Anzahl von Fahrzeugen erfolgt sobald eine neue Staulänge erfasst wird. Im Folgenden sind die Ergebnisse der 12 erhobenen Fahrstreifen aufgeführt. (Abbildung 114 – 125)

In der Simulation werden die Daten für jeden einzelnen Fahrstreifen einer Strecke erhoben. Die erhobenen Fahrstreifen weisen unterschiedliche Längen zwischen 86 bis 109 Metern auf. Dementsprechend kurz und begrenzt ist der Aufstellbereich vor der LSA. Die Erhebung über die Anzahl von Fahrzeugen erfolgt also größtenteils innerhalb der Aufstauung vor der LSA und nur ein recht geringer Teil auf der freien Strecke. Da das letzte Fahrzeug innerhalb der Aufstauung während der Bestimmung der Anzahl an Fahrzeugen stets ein vernetztes Fahrzeug ist, führt dies lediglich zu geringen Abweichungen bezüglich der erhobenen Anzahl an Fahrzeugen auf der Strecke/Fahrbahn.

Abbildung 114 – 125 stellt die Simulationsergebnisse der Fahrzeuganzahlbestimmung dar. Die Anzahl an Bestimmungen sinkt bei sinkender AvF deutlich. Die Auswertung der Abweichungen kann in drei Ausprägungen aufgeteilt werden:

Die Abweichungen werden in drei Kategorien unterteilt:

- keine Abweichung
- positiv sowie negative Abweichungen
- negative Abweichungen

Keine Abweichungen

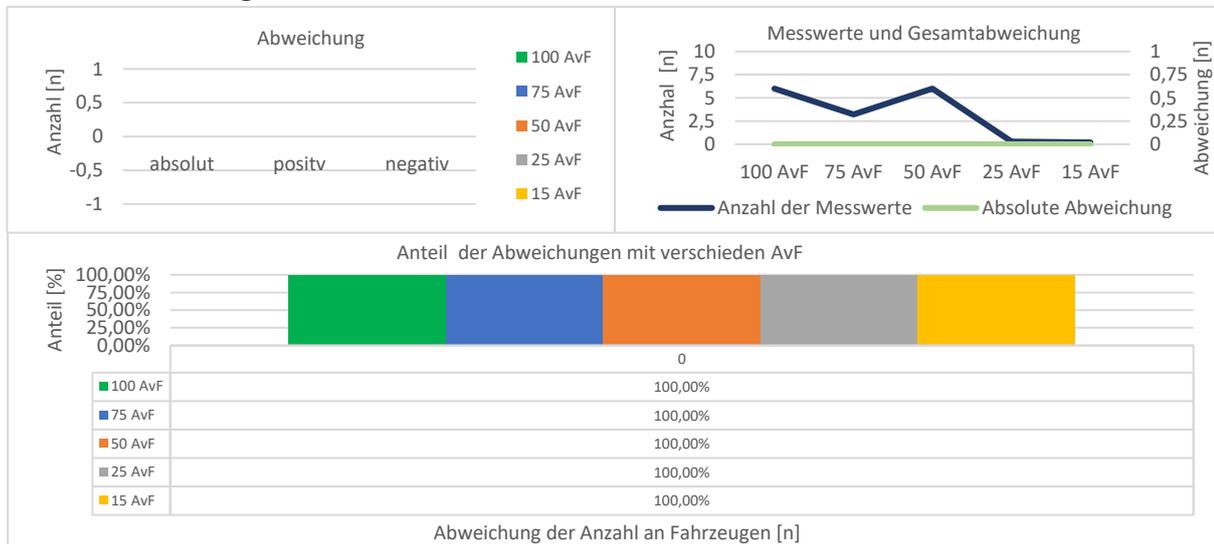


Abbildung 114: Altewiekring R Anzahl an Fahrzeugen

Positive sowie negative Abweichungen

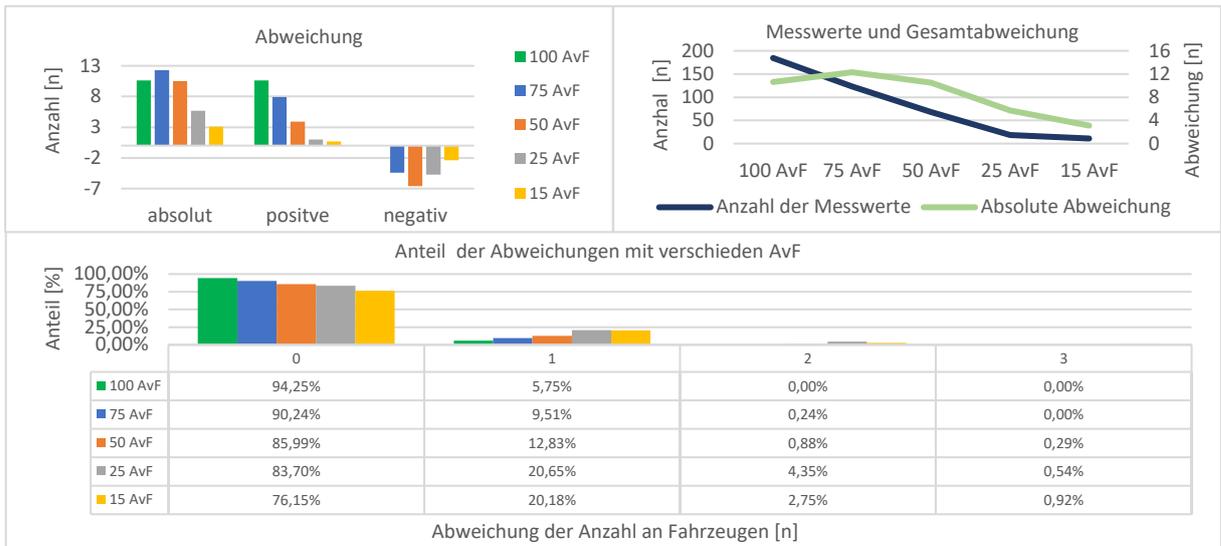


Abbildung 115: Altewiekring G Anzahl an Fahrzeugen

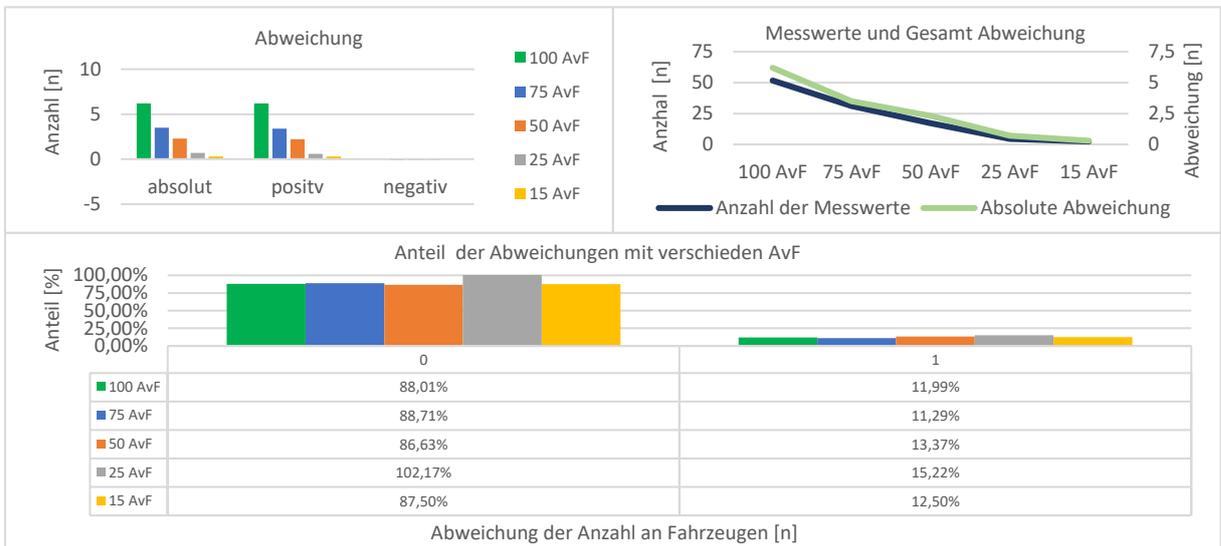


Abbildung 116: Altewiekring G Anzahl an Fahrzeugen

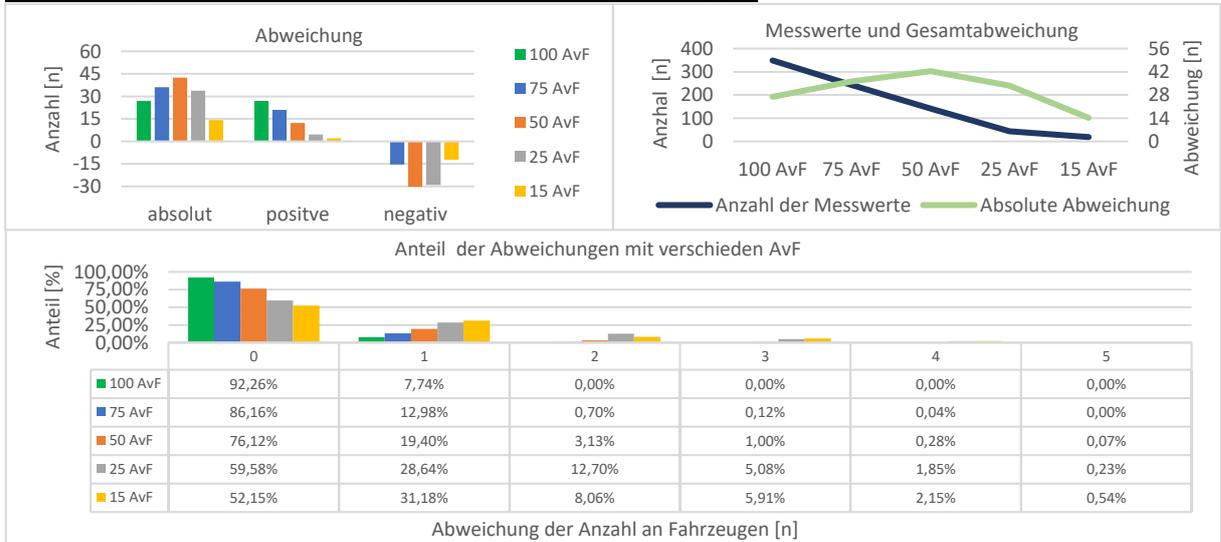


Abbildung 117: Willy-Brandt-Platz R/G Anzahl an Fahrzeugen

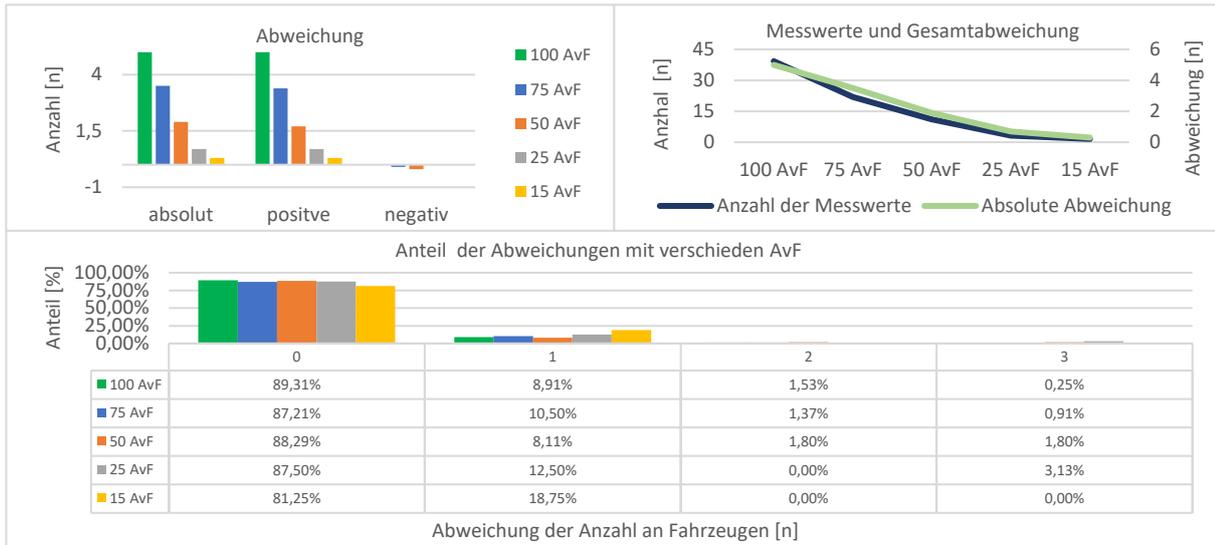


Abbildung 118: Willy-Brandt-Platz G Anzahl an Fahrzeugen

Negative Abweichungen

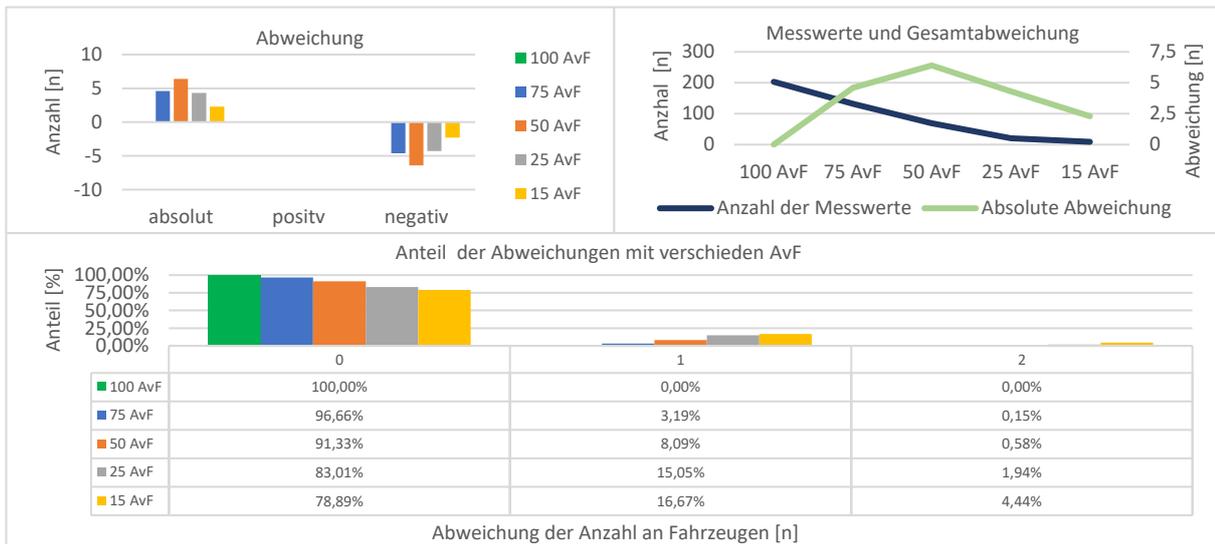


Abbildung 119: Leonhardplatz S-N R/G Anzahl an Fahrzeugen

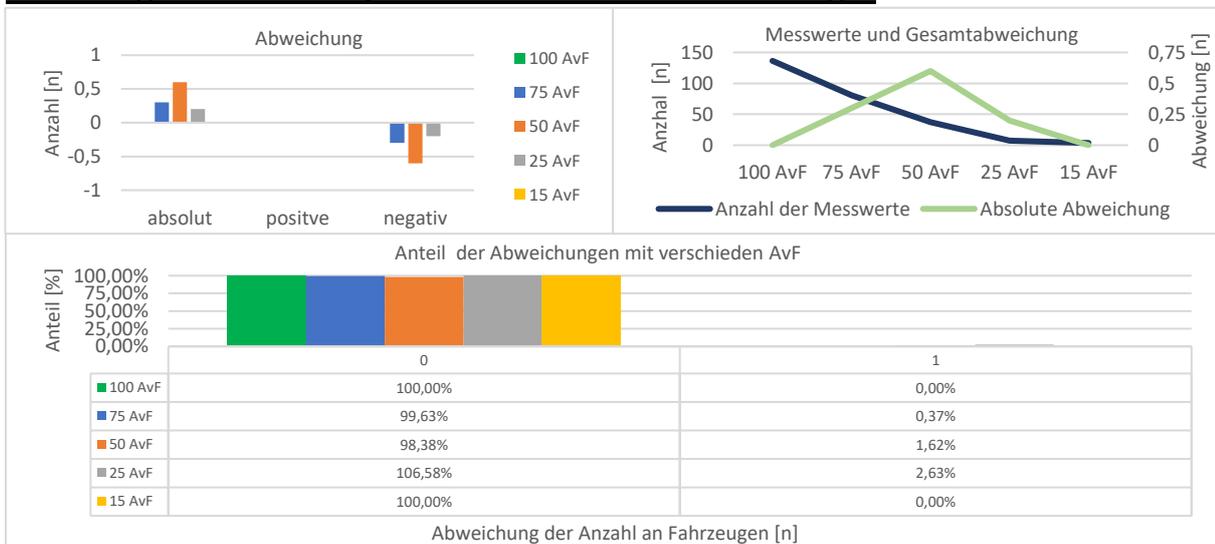


Abbildung 120: Leonhardplatz N-S G Anzahl an Fahrzeugen

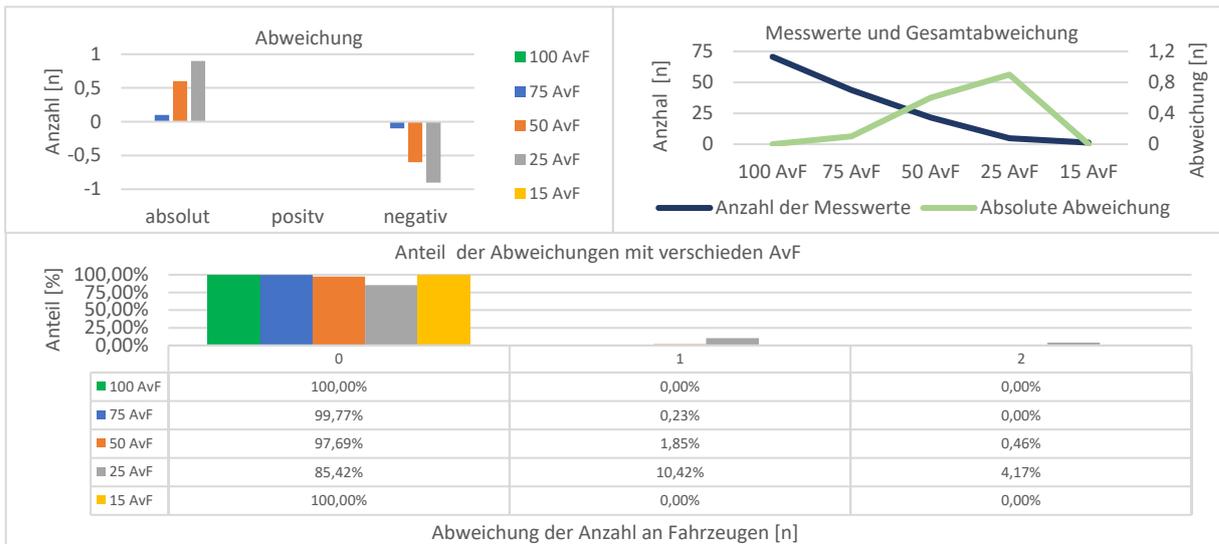


Abbildung 121: Willy-Brandt-Platz L Anzahl an Fahrzeugen

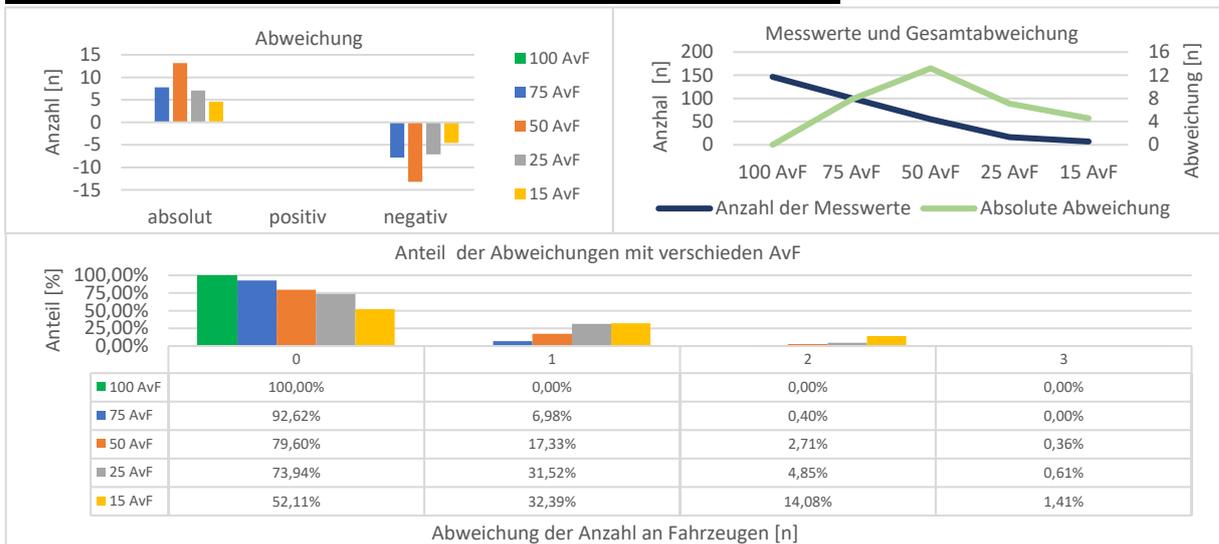


Abbildung 122: Leonhardplatz S-N R/G Anzahl an Fahrzeugen

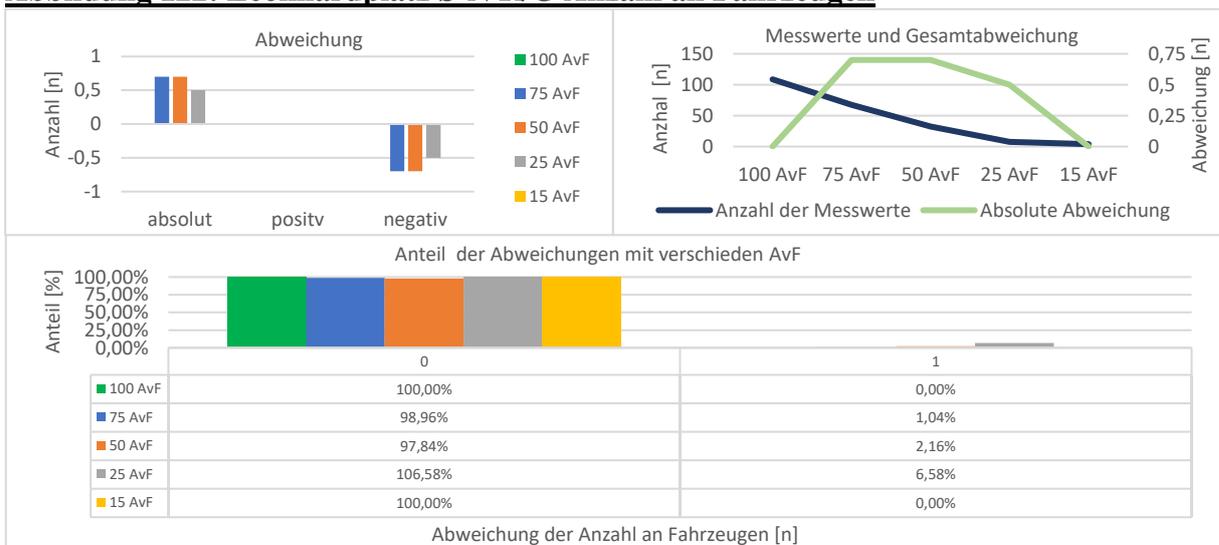


Abbildung 123: Leonhardplatz S-N G Anzahl an Fahrzeugen

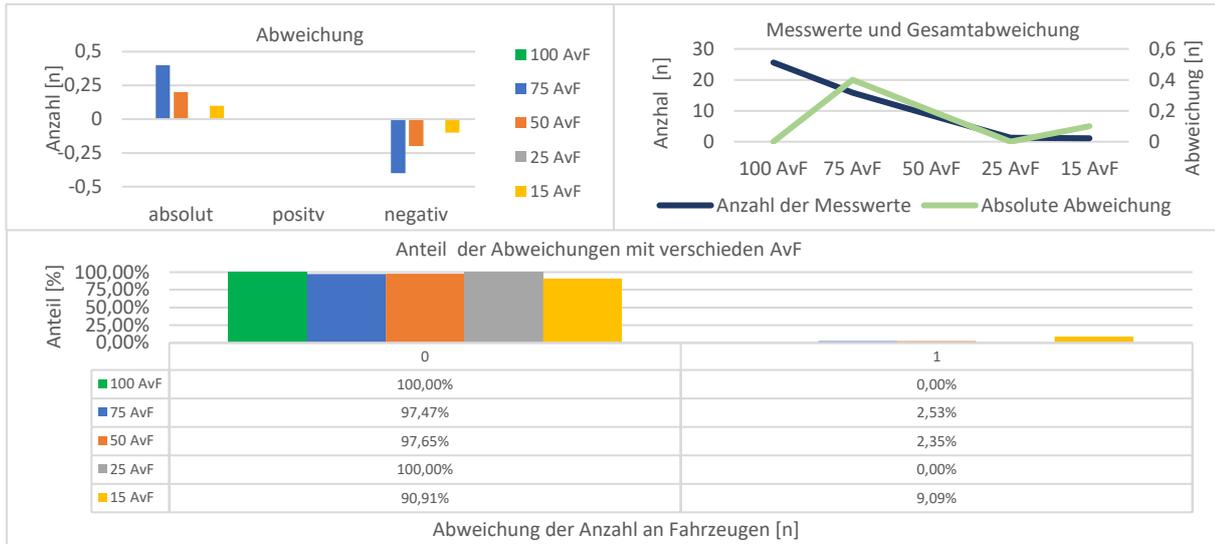


Abbildung 124: Leonhardplatz S-N L Anzahl an Fahrzeugen

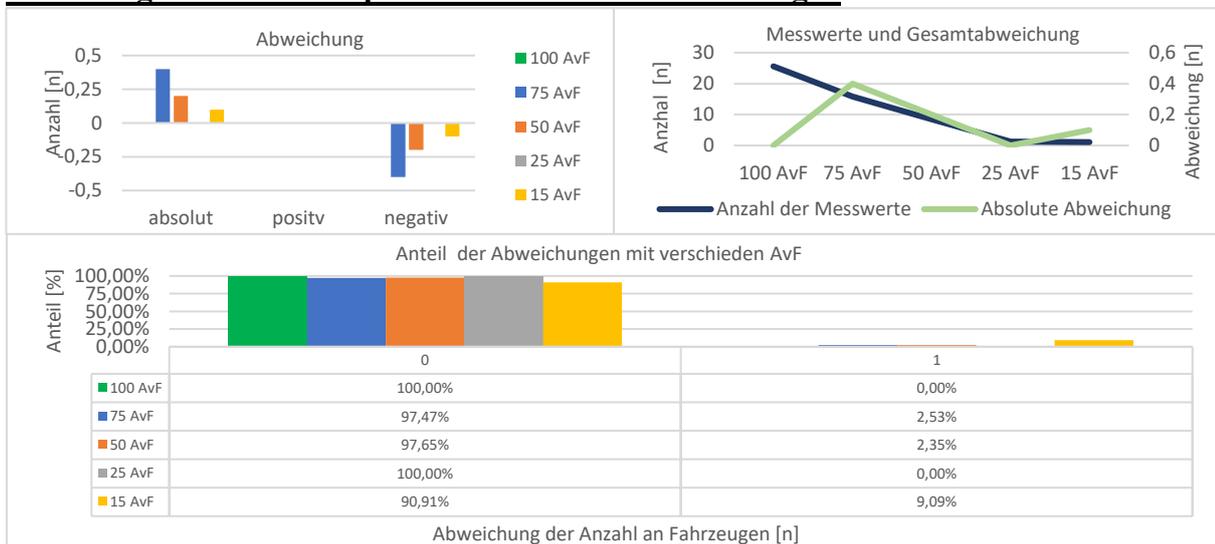


Abbildung 125: Leonhardplatz N-S L Anzahl an Fahrzeugen

Tabelle 3 fasst die Auswertungen der 12 Fahrstreifen zusammen. Folgende Werte sind dort aufgeführt.

N: Anzahl

N100AvF: Anzahl der durchgeführten Bestimmungen bei einer 100prozentigen AvF während der Simulationszeit.

Vorzeichen der Abweichung: Charakter der Abweichung

- : bedeutet Unterschätzung der Anzahl an Fahrzeugen

+ : bedeutet Überschätzung der Anzahl an Fahrzeugen

Intervall/100AvF: Statistischer Wert in s zwischen zwei Bestimmungen bei einer 100prozentigen AvF

AvF/ >= N50: Minimale Ausstattungsrate von vernetzten Fahrzeugen (AvF) bei mehr als 50 Bestimmungen im Erhebungszeitraum (>= N50)

N/ >= N50: Abweichung an Fahrzeugen (Anzahl Fahrzeuge = N) der minimalen AvF bei mehr als 50 Bestimmungen im Erhebungszeitraum (>= N50)

N-AvF: Maximale Abweichung an Fahrzeugen unter Einbeziehung aller AvF (N) zuzüglich der entsprechenden Ausstattungsrate von vernetzten Fahrzeugen (AvF)

	Verkehrsstrom	N100AvF	Intervall/100AvF	AvF/≥ N50	N/≥ N50	N bei AvF	Vorzeichen der Abweichung
Willy-Brandt-Platz	Rechts/Geradeaus	350	10 s	25	33,7	42,4 bei 50AvF	+/-
	Geradeaus	40	90 s	-	-	5 bei 100AvF	+/-
	Links	70	51 s	100	0	0,9 bei 25AvF	-
Altewiekring	Rechts	6	600 s	-	-	0	0
	Geradeaus	180	20 s	50	10,5	12,3 bei 75AvF	+/-
	Geradeaus	50	72 s	100	6,2	6,2 bei 100AvF	+/-
Leonardplatz S-N	Rechts/Geradeaus	150	24 s	50	13,2	13,2 bei 50AvF	-
	Geradeaus	110	33 s	75	0,7	0,7 bei 50AvF, 57AvF	-
	Links	25	144 s	-	-	0,4 bei 75AvF	-
Leonardplatz N-S	Rechts/Geradeaus	150	24 s	50	6,4	6,4 bei 50AvF	-
	Geradeaus	140	26 s	75	0,3	0,6 bei 50AvF	-
	Links	120	30 s	75	2	7,2 bei 25AvF	-

Tabelle 3: Zusammenfassung der Auswertung der Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar

Die Verkehrsströme Rechts/Geradeaus und Geradeaus weisen die häufigsten Bestimmungen auf, bedingt durch die erhöhte Verkehrsbelastung und der dadurch hohen Anzahl an Fahrzeugen. Bei Verkehrsströmen mit zwei Fahrstreifen pro Strecke finden die meisten Bestimmungen für den rechten Fahrstreifen statt. Auch hier ist die Verkehrsbelastung für den rechten Fahrstreifen höher als für den linken. Mit einer hohen Anzahl an Bestimmungen steigt jedoch auch die Fehlerquote. So zeigt sich für die Fahrstreifen Willy-Brandt-Platz R/G, Leonhardplatz S-N R/G, Altewiekring G sowie Leonhardplatz N-S R/G die höchste Abweichung der Anzahl an Fahrzeugen. Positive sowie negative Abweichungen bei der Anzahl an erhobenen Fahrzeugen weisen die Fahrstreifen Willy-Brandt-Platz R/G und Altewiekring G auf. Generell ist jedoch zu erkennen, dass eine Anzahlbestimmung überwiegend zu negativen Abweichungen führt. Das bedeutet, es werden zu wenig Fahrzeuge auf dem Fahrstreifen erhoben. Geht man davon aus, dass mindestens 50 Bestimmungen ($\geq N50$) im Erhebungszeitraum (3600 s) erfolgen, wird statistisch gesehen mindestens alle 72 Sekunden die Anzahl an Fahrzeugen bestimmt. Die Umlaufzeiten der LSA betragen in der Simulation 85 s und 75 s. Somit erfolgt theoretisch bei jedem Umlauf der LSA eine Bestimmung zur Anzahl an Fahrzeugen. Betrachtet man unter diesem Gesichtspunkt die einzelnen Fahrstreifen, zeigt sich folgende Mindestbestimmung (≥ 50):

Auf drei Fahrstreifen bei keiner AvF

Auf zwei Fahrstreifen bei 100 AvF

Auf drei Fahrstreifen bei 75 AvF

Auf drei Fahrstreifen bei 50 AvF

Auf einem Fahrstreifen bei 25 AvF

Mit dem Verfahren Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar ist eine Bestimmung über die Anzahl an Fahrzeugen unter Einsatz niedrigerer AvF nur bedingt möglich (z.B. Willy-Brandt-Platz R/G

bei minimal 25 AvF) Für die Mehrzahl der untersuchten Fahrstreifen ist eine minimale 50prozentige AvF von vernetzten Fahrzeugen erforderlich.

Mittels niedrigerer AvF ist demzufolge stetiges Monitoring bezüglich der Anzahl von Fahrzeugen nicht umsetzbar. Verzichtet man jedoch auf die durchgängige Erhebung, so erhält man trotz einer niedrigen AvF verhältnismäßig gute Werte, da die Abweichung an Fahrzeugen auch bei einer niedrigen AvF gering ist. (Abweichung von eins bis drei Fahrzeugen auf der Mehrzahl der Fahrstreifen) Aufgrund der recht kurzen Strecken ist die Bestimmung über die Anzahl an Fahrzeugen hier nur bedingt vom fahrzeugseitigem Radar abhängig. Hier könnten bezüglich der Untersuchung eines längeren Fahrstreifens andere Ergebnisse erzielt werden.

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In Kapitel 9.1 werden abschließend die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Ein kurzer Ausblick erfolgt in Kapitel 9.2.

9.1 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Generisches Netz - Strecke mit LSA

In dem einfachen generischen Netz wird auf einer 600 Meter langen Strecke/Fahrbahn eine Aufstauung vor einer LSA inszeniert. Bezüglich des **Abflussverfahrens** ist festzustellen, dass der Wirkungsgrad jeweils mit Hinblick auf die Höhe der Verkehrsbelastung sowie die daraus resultierende Aufstauung vor der LSA betrachtet werden muss. Es zeigte sich, dass hier die Ausstattungsrate an vernetzten Fahrzeugen nicht besonders hoch sein muss, um einen Abfluss bestimmen zu können. Lediglich ein vernetztes Fahrzeug in der Aufstauung ist zur Abflussbestimmung erforderlich. Dieses Fahrzeug muss allerdings für mindestens zwei Umläufe vor der LSA verweilen. Selbst bei einer minimalen 25prozentigen AvF erfolgt eine akzeptable Abflussbestimmung im untersuchten Szenario. Bis zu einer minimalen AvF von 50 % liefern die Verfahren **Bestimmung der maximalen Staulänge** und **Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar** akzeptable Werte. Für das **Ankunft 1** Verfahren wird festgestellt, dass Ankunft 1 bis zu einer minimalen 15prozentigen AvF den qualitativen Verlauf der Verkehrsbelastung der ankommenden Fahrzeuge unter zunehmender Streuung der Abweichung der erfassten Werte bei sinkender AvF abbilden kann. **Ankunft 2** und **Ankunft 3** können den qualitativen Verlauf der Verkehrsbelastung unter einer zunehmenden Unterschätzung der Werte sowie einer ansteigenden Streuung der Abweichung bei gleichzeitig sinkender AvF abbilden. Für Ankunft 3 gilt der minimale Wert einer 15prozentigen AvF, für Ankunft 2 erhöht sich die erforderliche AvF auf mindestens 50 %. Ein direkter Vergleich der drei Ankunftsverfahren im Simulationsszenario zeigt einen praktikablen Einsatz von Ankunft 3 bei einer 100-25prozentigen AvF. Bei einer geringeren AvF von 25 %-15 % ist der Einsatz des Ankunft 1 Verfahrens am geeignetsten. Es wurde auch eine Kombination dieser beiden Verfahren in Erwägung gezogen, jedoch nicht untersucht.

Generisches Netz - Strecke ohne LSA

Die Verfahren **Bestimmung der maximalen Staulänge** bei einer minimalen 25prozentigen AvF und **Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar** bei einer 50prozentigen AvF können im betrachteten Simulationsszenario mit einer akzeptablen Abweichung angewendet werden. Für **Ankunft 3** (ohne LSA) ist bis zu einer minimalen AvF von 15 % eine qualitative Abbildung der Verkehrsbelastung unter einer ansteigenden Streuung der Abweichung und zunehmenden Unterschätzung der erfassten Werte bei gleichzeitig sinkender AvF zu verzeichnen.

Generisches Netz – mit und ohne LSA

Bei der Untersuchung im generischen Netz (mit und ohne LSA) stellte sich heraus, dass vier von neun Verfahren eine minimale 50prozentige AvF benötigen, um verwendbare Daten zu liefern. Zwei Verfahren sind auf eine 25prozentige AvF angewiesen und drei weitere Verfahren nur auf eine minimale 15prozentige AvF.

Braunschweiger Knotenpunkte

Die erarbeiteten Verfahren werden in einer Abbildung eines realen innerstädtischen Straßennetzes untersucht und angewendet. Die Simulation erfolgt im Rahmen des Braunschweiger Streckennetzes an insgesamt zwei Knotenpunkten mit 12 Fahrstreifen. Für akzeptable Werte der **maximalen Staulängenbestimmung** ergibt sich im Braunschweiger Szenario eine minimale AvF von 50 %. Für **Ankunft 1** hat in der Simulation recht selten eine Abflussbestimmung stattgefunden, sodass häufig nur eine Schätzung des Abflusses verarbeitet wurde. Lediglich für zwei Linksabbiegerfahrstreifen fand häufig eine Abflussbestimmung statt. Für diese beiden Fahrstreifen konnte bis zu einer minimalen 50prozentigen AvF eine Bestimmung der Grundverkehrsbelastung ohne Detektion von Verkehrsbelastungsspitzen erfolgen. Bis zu einer minimalen AvF von 15 % war es mit Ankunft 1 für zwei weitere Fahrstreifen möglich, den qualitativen Verlauf von Nachfragespitzen stark geglättet abzubilden. Hier wird der Abfluss geschätzt und die Veränderung der Verkehrsbelastung nur mittels Bestimmung der maximalen Staulänge erfasst.

Mit **Ankunft 2** können lediglich für drei Linksabbiegerfahrstreifen plausible Werte erzielt werden. Die qualitative Abbildung der Verkehrsbelastung erfolgt dabei auf zwei Fahrstreifen mit einer minimalen 50prozentigen AvF und mit einer 75prozentigen AvF beim dritten Fahrstreifen unter jeweils zunehmender Unterschätzung bei sinkender AvF.

Ankunft 3 ermöglicht auf insgesamt sieben Fahrstreifen die Wiedergabe eines qualitativen Verlaufs der Verkehrsbelastung unter Anwendung verschiedener AvF. Die Detektion der Verkehrsbelastungsspitzen erfolgt auf vier Fahrstreifen mit einer minimalen 25prozentigen AvF sowie auf drei Fahrstreifen mit der minimalen AvF von 15 %. Zum Teil findet die qualitative Abbildung der Verkehrsbelastung recht präzise, mit zunehmender Unterschätzung statt, teils aber auch mit einer zunehmenden Glättung sowie Unterschätzung der Werte bei gleichzeitig sinkender AvF.

Die minimale AvF für eine erfolgreiche Detektion mittels dem Verfahren **Anzahl an Fahrzeugen mittels Radar** beträgt auf der Mehrzahl der Fahrstreifen mindestens 50% bis 75% AvF. Für einen Fahrstreifen in der Untersuchung ergab sich hier sogar ein Wert von einer minimalen AvF von 25 %. Ein stetiges Monitoring bezüglich der Anzahl von Fahrzeugen auf der Strecke ist mit den erarbeiteten Verfahren unter Einsatz einer niedrigeren AvF von weniger als 50 % nicht möglich. Verzichtet man auf die Stetigkeit der Erhebung, so kann die Anzahl an Fahrzeugen auch bei einer AvF von weniger als 50 % bestimmt werden, jedoch mit geringen Abweichungen.

Zusammenfassung

Innerhalb der beiden Simulationsszenarien (generisches Netz/ Braunschweiger Netz) zeigen sich gewisse Parallelen in Hinblick auf die Funktionalität der Verfahren in Abhängigkeit der angewandten jeweiligen Ausstattungsrate an vernetzten Fahrzeugen. Eine Steigerung der Komplexität des Verkehrsablaufes (Fahrstreifenwechsel, mehrere Verkehrsströme pro Knotenarm) stellt sich im Simulationsszenario des Braunschweiger Netzes für die Ankunftsverfahren (Ankunft 1, Ankunft 2, Ankunft 3) und das Abflussverfahren als eine Herausforderung dar. Dementsprechend können nicht für alle Fahrstreifen und Situationen plausible Werte erhoben werden. Es besteht für erarbeiteten die Verfahren noch Optimierungsbedarf.

In beiden Szenarien (generisches Netz/ Braunschweiger Netz) zeigt sich, dass mit Ankunft 1 der qualitative Verlauf der Verkehrsbelastung mit steigender Streuung der Abweichung bei gleichzeitig sinkender AvF abgebildet werden kann. Ähnliches gilt für Ankunft 2 und Ankunft 3. In beiden Szenarien kann der qualitative Verlauf der Verkehrsbelastung mit zunehmender Streuung der Abweichung sowie steigender Unterschätzung der Werte bei gleichzeitig sinkender AvF abgebildet werden. Es ist demnach möglich, mittels der drei Ankunftsverfahren auch unter Verwendung niedrigerer AvF Daten zu erheben, die jedoch mit niedrigeren AvF nicht direkt die reale/aktuelle Verkehrsbelastung wiedergeben. Aufgrund der zunehmenden Streuung der Abweichung sowie der steigenden Unterschätzung der Werte, teils auch geglätteten Darstellung des Kurvenverlaufs bei sinkender AvF, müssten die erhobenen Daten der Ankunftsverfahren eines weiteren Verarbeitungsschrittes bzw. einer Interpretation unterzogen werden. Hier müsste ggfs. eine gewisse Korrektur der Ausprägungen (bei bestimmten AvF) erfolgen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass es generell möglich ist, Daten des Verkehrsablaufes anhand bzw. mittels vernetzter Fahrzeuge zu erheben. Auch unter dem Einsatz geringerer Ausstattungsrate von vernetzten Fahrzeugen konnten Daten des Verkehrsablaufes erhoben werden. Die jeweilige Ausstattungsrate von vernetzten Fahrzeugen (AvF) spielt stets eine wichtige Rolle. Je höher der Wert der Ausstattungsrate von vernetzten Fahrzeugen ist, um so präziser erweist sich die Aussagekraft der erhobenen Daten. Nicht zu vernachlässigen ist gleichfalls der Einfluss einer ausreichenden Verkehrsbelastung und die daraus resultierende Aufstauung vor einem Knotenpunkt. Ist diese zu gering, wirkt sich das negativ auf die Qualität der Daten aus. Die Güte der Daten ist maßgeblich im Zusammenhang von der prozentualen AvF und der Aufstauungen vor einem Knotenpunkt zu sehen.

Dementsprechend kann die Aussage getroffen werden:

Bei geringerer AvF sowie geringen Aufstauungen vor Knotenpunkten steigt die Fehlerquote der erhobenen Daten für die jeweils untersuchten Verfahren bzw. es findet keine Datenerhebung statt.

Innerhalb der Untersuchung und Simulation eines realen Straßennetzes zeigt sich, dass die Mehrzahl der erarbeiteten Verfahren bei einer Ausstattungsrate von vernetzten Fahrzeugen von weniger als 50 % keine verwendbaren Daten des aktuellen Verkehrsablaufes liefern. Das

heißt, eine AvF von weniger als 50 % führt im Rahmen des Braunschweiger Szenarios zu fehlerhaften Werten der Datenerhebung bzw. ermöglicht keine stetige Erhebung von Daten bei den untersuchten Verfahren. Eine Ausnahme stellen die Verfahren Ankunft 1 und Ankunft 3 dar. Ihre Funktionalität ist selbst bei einer minimalen 15prozentigen AvF gegeben. Hier wird jedoch nur der qualitative Verlauf der Verkehrsbelastung wiedergegeben. Zur direkten Bestimmung des aktuellen Verkehrsablaufes müssten die Daten von Ankunft 1 und Ankunft 3 jedoch noch einer weiteren Verarbeitung unterzogen werden.

9.2 AUSBLICK

Heutzutage sind auf unseren Straßen recht wenige bzw. keine vernetzten Fahrzeuge unterwegs, die ihre Daten über das V2X ITS ETSI Netz frei zur Verfügung stellen. Die wenigen vorhandenen vernetzten Fahrzeuge sowie die dafür notwendige V2X Infrastruktur sind meist Bestandteile von Forschungsprojekten, wie zum Beispiel das „Testfeld Niedersachsen“ des DLRs. Um Verfahren mittels vernetzter Fahrzeuge im realen Straßenverkehr testen zu können, muss die Ausstattungsrate an vernetzten Fahrzeugen erheblich gesteigert werden. Dies nimmt wiederum Zeit in Anspruch. Ältere Fahrzeuge (nicht vernetzte Fahrzeuge) müssen sukzessive durch vernetzte Fahrzeuge ersetzt und ergänzt werden. Um eine schnellere Erhöhung der AvF zu erreichen, ist eine Ausstattung alter Fahrzeuge mit z.B. mobilen Devisen denkbar, die Technik für eine drahtlose Kommunikation enthalten und Daten des Fahrzeuges abgreifen können. Voraussetzung hierfür ist auch eine ausreichende V2X Infrastruktur zur drahtlosen Kommunikation. Dazu zählen vernetzte Lichtsignalanlagen, infrastrukturseitige Stationen zum Senden und Empfangen von Nachrichten sowie Rechner und Managementsysteme zum Verarbeiten der generierten Daten der vernetzten Fahrzeuge.

Die in dieser Arbeit erarbeiteten Verfahren und ihre generierten Daten könnten als Basisdaten für weitere Datenverarbeitungen und Untersuchungen eingesetzt werden. Denkbar wäre eine Erkennung von Mustern, um Rückschlüsse auf den aktuellen Verkehrsablauf mittels künstlicher Intelligenzen und neuronaler Netze vornehmen zu können. Die Zuhilfenahme von historischen Daten könnte ebenfalls hilfreich sein, um die Datenbasis zu optimieren. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen gelten feste Rahmenbedingungen (z.B. einheitliche Fahrzeuglängen, vorgegebene Fahrstreifenwechsel), die jedoch im realen Straßenverkehr komplexer und unter vielfältigeren Einflüssen ablaufen. Unter dem Gesichtspunkt besteht demnach für die erarbeiteten Verfahren noch Erweiterungs- bzw. Optimierungsbedarf.

10 LITERATURVERZEICHNIS

- [Cech et al.]** Markus, Cech: Fahrspurschätzung aus monokularen Bildfolgen für innerstädtische Fahrerassistentenanwendungen. In: Schriftenreihe Institut für Mess- und Regelungstechnik. Band 013. Hannover: Universität Karlsruhe (TH), 2009.
- [C-Roads]** C-Roads Germany: 2020, 02.01.20, 8:00 Uhr. Verfügbar unter <https://www.c-roads-germany.de/english/c-its-services/glosa/>
- [Eckelmann et al.]** Sven, Eckelmann; Toralf, Trautmann; Hagen, Ußler; Benjanmin, Reichelt; Oliver, Michler: V2V-Communication, LiDAR System and Positioning Sensors for Future Fusion Algorithms in Connected Vehicles. In: Transportation Research Procedia 27 (2017), S. 69 – 76.
- [ETSI (2009)]** European Telecommunications Standards Institute: ETSI TR 102 638 V1.1.1 (2009-06). Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions. European Telecommunications Standards Institute, 2009.
- [ETSI (2010)]** European Telecommunications Standards Institute: ETSI EN 302 665 V1.1.1 (2010-09). Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture. European Telecommunications Standards Institute, 2010.
- [ETSI (2014)]** European Telecommunications Standards Institute: ETSI EN 302 637-2 V1.3.2 (2014-11). Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service. European Telecommunications Standards Institute, 2014.
- [ETSI (2016)]** European Telecommunications Standards Institute: ETSI TS 103 301 V1.1.1 (2016-11). Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Facilities layer protocols and communication requirements for infrastructure services. European Telecommunications Standards Institute, 2016.
- [ETSI (2018)]** European Telecommunications Standards Institute: ETSI TS 101 539-2 V1.1.1 (2018-06). Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 2: Intersection Collision Risk Warning (ICRW) application requirements specification. European Telecommunications Standards Institute, 2018.
- [FSGV HmV]** Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Hinweise zur mikroskopischen Verkehrssimulation. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 2006.

- [FSGV RiLSA]** Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für Lichtsignalanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 2010.
- [Gao et al.]** Kai, Gao; Farong, Han; Pingping, Dong; Naixue, Xiong; Ronghua, Du: Connected Vehicle as a Mobile Sensor for Real Time Queue Length at Signalized Intersections. In: Sensors 2019, 19, 2059, S.1-22.
- [Google]** google maps: 2020, 05.01.20, 14:00 Uhr. Verfügbar unter: <https://www.google.de/maps/@52.2643164,10.5161228,14z>
- [Gramaglia et al.]** Marco, Gramaglia; Carlos J. Bernardos; Maria, Calderon: Virtual Induction Loops Based on Cooperative Vehicular Communications. In: Sensors 2013, 13, S. 1467-1476.
- [ISO2017]** ISO 2017: Intelligent transport system- Cooperative ITS – Using V2I and I2V communications for applications. ISO 2017, 2017.
- [Kobbeloer]** Detlef, Kobbeloer: Dezentrale Steuerung von Lichtsignalanlagen. In urbanen Verkehrsnetzen Institut für Verkehrswesen Universität Kassel, 2007.
- [Kühnel et al.]** Carsten, Kühnel: Verkehrsdatenerfassung mittel Floating Car Observer auf zweistreifigen Landstraßen. In: Verkehr. Heft 23. Kassel: 23 Institut für Verkehrswesen Fachgebiet Verkehrstechnik und Transportlogistik Universität Kassel, 2011.
- [Lehnhoff]** Nicola, Lehnhoff: Überprüfung und Verbesserung der Qualität von Automatisierten erhobenen Daten an Lichtsignalanlagen. Hannover, 2005.
- [Naumann et al.]** Sebastian, Naumann; Franziska, Wolf; René, Schönrock: Floating Car Observer – An innovative vehicle-sensor for urban and highway scenarios. IFAC, 2010.
- [Park et al.]** Park, Byungkyu; Schneeberger, J. D.: Microscopic Simulation Model Calibration and Validation. In: Transportation Research Record. Paper No. 03-2531 (1856), S.185-192.
- [Priemer et al.]** Christian, Priemer; Bernhard, Friedrich: A method for tailback approximation via c2i-data Based on partial penetration. Hannover, n. d..
- [Roncoli et al.]** Claudio, Roncoli; Ioannis, Papamichail; Markos, Papageorgiou: Model predictive control for motorway traffic with mixed manual and VACS-equipped vehicles. In: Transportation Research Procedia 10 (2015), S. 452 – 461.

- [SUMO a]** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: SUMO. 2020, 05.01.2020, 09:50 Uhr. Verfügbar unter: <https://sumo.dlr.de/index.html>
- [SUMO b]** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Beschreibung von SUMO. 2020, 05.01.2020, 10:00 Uhr. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931_read-41000/
- [SUMO c]** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Beschreibung von TraCI. 2020, 05.01.2020, 10:10 Uhr. Verfügbar unter: https://sumo.dlr.de/docs/TraCI.html#traci_commands
- [Tischler]** Kathleen, Tischler: Neue Ansätze zur Nutzung von Induktionsschleifen-Daten an Lichtsignalanlagen: Minimierung von Fahrzeughalten und Schätzung von Kfz-Wartezeiten. Dresden, 2015.
- [University of Virginia]** CTS Pooled Fund Study, University of Virginia: Traffic Management Centers in a Connected Vehicle Environment. In a connected vehicle environment Task 2. Investigation of Expected Changes in TMCs. Kimley-Horn and Associates, inc. Noblis, 2013.
- [VILAL]** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: VTAL. 2020, 04.01.20, 10:00 Uhr. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/ts/desktopdefault.aspx/tabid-10704/20365_read-42579/
- [Winner et al.]** Hermann, Winner; Stephan, Hakuli; Gabriele, Wolf(Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, Vieweg+Teubner, 2009.

11 ANHANG

Anhang 1: Fahrstreifenbezeichnungen der Braunschweiger Knotenpunkte (in SUMO):

Altewiekring

320364657_0 (R); 320364657_1 (G); 320364657_2 (G)

Leonhardplatz S-N

320364658_0 (R/G); 320364658_1 (G); 320364658_2 (L)

Leonhardplatz N-S

503735158_0 (R/G); 503735158_1 (G); 503735158_2 (L)

Willy-Brandt-Platz

316917600_0 (R/G); 316917600_1 (G); 316917600_2 (L);

Anhang 2: Kurzfassung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit werden Verfahren erarbeitet, die mithilfe dynamischer Daten vernetzter Fahrzeuge unter Mischverkehrsbedingungen (keine Vollausrüstung mit vernetzten Fahrzeugen) verkehrliche Größen bestimmen können. Ziel war es, mit vernetzten Fahrzeugen auch nicht vernetzte Fahrzeuge detektieren zu können. Hierfür wird ein vernetztes Fahrzeug als „mobiler“, „virtueller“ Detektor genutzt, um dessen Bewegungszustand sowie Position zu erhalten und zu verarbeiten. Der Einsatz eines vernetzten Fahrzeuges als Moving Observer, das mittels fahrzeugseitigem Radar seine Umgebung erfasst, wird betrachtet. Auf Grundlage dieser beiden Ansätze werden die Verfahren erarbeitet und simuliert. Die Verfahren sind in der Lage, die ankommenden Fahrzeuge, die Staulänge, die abfließenden Fahrzeuge sowie die Anzahl an Fahrzeugen auf einer Strecke bzw. einem Fahrstreifen zu bestimmen. Die Untersuchung der Verfahren wurde mithilfe eines einfachen generischen Netzes (signalisierter und vorfahrts geregelter Knotenpunkt) sowie zweier realer Braunschweiger Knotenpunkte in SUMO unter Einsatz verschiedener Ausstattungsraten von vernetzten Fahrzeugen (100 % ,75 % ,50 % ,25 % ,15 %) durchgeführt. Die unterschiedlichen Ausstattungsraten von vernetzten Fahrzeugen (AvF) sollen Rückschlüsse und mögliche Grenzen hinsichtlich der Funktionstüchtigkeit der Verfahren in Bezug auf die Ausstattungsrate von vernetzten Fahrzeugen aufzeigen. Es stellt sich heraus, dass es generell möglich ist, Daten des Verkehrsablaufes anhand bzw. mittels mehrerer vernetzter Fahrzeuge zu erheben. Selbst unter Einsatz geringer Ausstattungsraten von vernetzten Fahrzeugen können Daten erhoben werden. Die Untersuchung der erarbeiteten Verfahren hat gezeigt, je höher der Wert der AvF ist, umso präziser erweist sich die Aussagekraft der erhobenen Daten. Eine ausreichende Verkehrsbelastung und die daraus resultierende Aufstauung vor einem Knotenpunkt spielt bei der Funktionalität der Verfahren ebenfalls eine wichtige Rolle.

Innerhalb der Untersuchung und Simulation des realen Straßennetzes zeigt sich, dass die Mehrzahl der erarbeiteten Verfahren bei einer Ausstattungsrate von vernetzten Fahrzeugen von weniger als 50 % keine verwendbaren Daten, bzw. Daten mit zu großen Abweichungen, liefern. Eine Ausnahme stellen zwei Verfahren dar, deren Funktionalität selbst bei einer minimalen 15prozentigen AvF gegeben ist. Hier wird jedoch nur der qualitative Verlauf der Verkehrsbelastung wiedergegeben. Somit sei darauf hingewiesen, dass die generierten Daten

noch einer weiteren Verarbeitung und Interpretation unterzogen werden müssten, um direkte Informationen über den Verkehrsablauf liefern zu können.

Anhang 3: Eidesstattliche Erklärung

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Braunschweig, 28. Januar 2020 _____