



Kalibrierung einer Verkehrsflusssimulation mit dem Ziel einer verkehrssicherheitsrelevanten Trajektorienanalyse

MASTERARBEIT

vorgelegt von

Mag. phil. Eva Medicus, BSc.

bei

Univ. Prof. Dr. Ing. Martin Fellendorf

Technische Universität Graz

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Michael Haberl

Technische Universität Graz

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Graz, 04.09.2019

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 01.10.2016 Genehmigung des Senats am 29.02.2016

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen / Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit/Diplomarbeit identisch.

Graz, _____

Mag. phil. Eva Medicus, BSc.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. This document is identical with the electronic version uploaded via TUGRAZonline.

Graz, _____

Mag. phil. Eva Medicus, BSc.

Aufgabenstellung für die Masterarbeit

von Frau Eva Medicus

Graz, am 23.10.2017

Erweiterung einer Verkehrsflusssimulation zur Modellierung unfallvermeidender Eingriffe

Problemstellung

Forschungen zur Verkehrssicherheit waren lange Zeit durch eine Auswertung historischer Unfalldaten und daraus ableitbarer reaktiver Infrastrukturmaßnahmen an Unfallhäufungsstellen geprägt. Statt ausschließlich auf Unfallursachen und bauliche oder verkehrsplanerische Maßnahmen zu achten, werden in den letzten Jahren verstärkt auch proaktive Untersuchungsmethoden entwickelt. Mit diesen Methoden sollen sicherheitsrelevante Erkenntnisse bereits in der Planungsphase von infrastrukturellen Maßnahmen erzielt werden. Simulationsmodelle stellen für den proaktiven Zugang ein geeignetes Werkzeug dar, da diese bereits im Vorfeld Verkehrssicherheitsanalysen ermöglichen.

In mikroskopischen Verkehrsflussmodellen wird speziell der Verkehrsablauf von Einzelfahrzeugen im Zusammenspiel mit mehreren Fahrzeugen untersucht. Bezüglich Verkehrssicherheitsbetrachtung stützt sich die mikroskopische Modellierung auf die Konflikttheorie. Ganz allgemein wird ein Verkehrskonflikt als eine beobachtbare Situation definiert, in der sich zwei oder mehr Verkehrsteilnehmer räumlich und zeitlich so weit annähern, dass eine Kollision bei unveränderter Bewegung unmittelbar bevorsteht. Aufgrund dieser Definition ist einem Unfall stets ein Verkehrskonflikt vorausgegangen.

Während die Kalibrierung von Verkehrsflusssimulationsmodellen für verkehrliche Fragestellungen weitgehend definiert ist, fehlen noch klare Empfehlungen für sicherheitsbezogene Untersuchungen, die hinsichtlich des Bewegungsablaufs des Einzelfahrzeug höhere Genauigkeitsanforderungen stellen. So werden Parameter von Konfliktflächen (wie Sichtweiten und Zeitlücken) in mikroskopischen Modellen häufig nur unzureichend kalibriert. Was für verkehrliche Analysen nur geringfügige Auswirkungen hat, erscheint für Verkehrssicherheitsbetrachtungen jedoch elementar. Auch fahrdynamische Aspekte werden in mikroskopischen Modellen kaum berücksichtigt. Die mangelnde Berücksichtigung der Fahrkinematik kann jedoch zu Ungenauigkeiten der Trajektorien insbesondere bei Kurvenfahrten führen und damit Konfliktpotentiale beeinflussen.

In der Fahrzeugsicherheitsforschung bedient man sich nanoskopischer Modelle, welche den Bewegungslauf in Längs- und Querrichtung unter Einbeziehung fahrphysikalischer Randbedingungen detailliert abbilden. Im Speziellen werden Unfallrekonstruktionen durchgeführt, bei denen fahrdynamische Aspekte und die Auswirkungen auf die am Unfall beteiligten Verkehrsteilnehmer analysiert werden. Eine Berücksichtigung fahrdynamischer Effekte und dadurch genauere Parametrisierung des Fahrverhaltens kann zu einer Verbesserung der mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen mit Fokus auf Verkehrssicherheitsaspekte führen. In der nanoskopischen Verkehrssimulationen kann auch die Kollisionsschwere oder eine mögliche Kollisionsvermeidung durch Fahrassistenzsysteme ermittelt werden. Welche Auswirkungen die evasiven Eingriffe (unfallvermeidende Maßnahmen) auf die gesamte Verkehrssituation und den umgebenden Verkehr hat, kann jedoch ohne eine Rückkopplung zu Verkehrsflusssimulationsmodellen nicht beantwortet werden.

Aufgabenstellung

In der Arbeit sollen Methoden zur Kalibrierung von mikroskopischen Verkehrsflussmodellen mit Fokus auf verkehrssicherheitstechnische Anwendungen erarbeitet werden, um die Auswirkungen evasive Eingriffe unterschiedlicher Parametrierungen von Fahrerassistenzsystemen auf den Verkehrsfluss beurteilen zu können. Die folgende Liste enthält wesentliche Bearbeitungspunkte der Masterarbeit; Abweichungen mit fortschreitendem Erkenntnisstand während der Bearbeitung sind möglich.

- Literaturrecherche zum Thema Straßenverkehrssicherheit mit Fokus auf die Konflikttheorie und deren Verwendung als proaktive Untersuchungsmethode in mikroskopischen Verkehrsflussmodellen. Vertiefte Recherche von Kalibrierungsmethoden für Mikrosimulationen für verkehrssicherheitstechnische Anwendungen.
- Vertiefte Beschäftigung mit nanoskopischen Verkehrssimulationen aus der Fahrzeugsicherheitsforschung und deren modellseitigen fahrdynamischen Berücksichtigung. Überprüfung der Integrationsmöglichkeiten der dynamischen Effekte (rutschende Reifen, Lenkradeinschlag) für Fahrverhalten innerhalb von mikroskopischen Verkehrsflussmodellen.
- Erstellung von Mikrosimulationen ausgewählter Verkehrsanlagen mit erhöhtem Unfallrisiko im Großraum Graz unter Berücksichtigung aller relevanter Verkehrsmodi.
- Kalibrierung der Mikrosimulationen mit Fokus auf verkehrssicherheitsrelevante Modellparameter unter Berücksichtigung von Erkenntnissen aus der nanoskopischen Fahrdynamik und der geometrischen Sichtverhältnisse:
 - Parametrierung von Konfliktflächen (Sichtbarkeit, Zeitlücken, etc.)
 - Parametrierung von Langsamfahrbereichen an Kreuzungspunkten
 - Parametrierung von Beschleunigungs-, Verzögerungsverhalten, etc.
- Untersuchung der verkehrs- und sicherheitstechnischen Auswirkungen bei Parametervariation.
- Kopplung von extern ermittelten Trajektorien mit der Verkehrsflusssimulation Vissim; d.h. Bewegungslinien, die aus der nanoskopischen Verkehrssimulationen für einzelne Fahrzeuge mit Assistenzsystemen zur Konfliktvermeidung ermittelt wurden, müssen in die Verkehrsflusssimulation eingespielt werden können, so dass Auswirkungen evasiver Eingriffe auf den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit bei unterschiedlicher Parametrierung der Fahrerassistenzsysteme beurteilt werden können.

Für die Anfertigung der Masterarbeit wird die Verkehrsfluss-Simulationssoftware VISSIM zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus soll die Software SSAM (Surrogate Safety Assessment Model) genutzt werden. Die bereitgestellten Daten dürfen ausschließlich zur Anfertigung der Masterarbeit genutzt werden; Datenschutzrichtlinien sind einzuhalten.

Die Arbeit ist zweifach mit allen Anlagen in DIN A4 gebunden einzureichen. Ein Datenträger mit dem Schriftstück, Präsentationen sowie allen Analyse- und Simulationsdaten ist beizulegen.

Univ-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf
Tel. +43 (0)316 873 6220
E-Mail: martin.fellendorf@tugraz.at
Betreuer

Dipl.-Ing. Michael Haberl
Tel.: +43 (316) 873 6226
E-Mail: michael.haberl@tugraz.at
Mitbetreuender Assistent

Kurzfassung

Kalibrierung einer Verkehrsflusssimulation mit dem Ziel einer verkehrssicherheitsrelevanten Trajektorienanalyse

127 Seiten, 182 Abbildungen, 45 Tabellen

Die Verkehrssicherheitsanalyse hat in den letzten Jahren in der mikroskopischen Verkehrsflussmodellierung und in der damit einhergehenden Kalibrierung zunehmend an Bedeutung gewonnen. Auch wenn die Kalibrierungsmethodik verkehrlicher Kenngrößen weitgehend definiert ist, kann diese nicht direkt auf verkehrssicherheitsspezifische Analysen übertragen werden. Zurückzuführen ist dies darauf, dass Fragestellungen zur Verkehrssicherheit eine andere Parametrierung voraussetzen. So sind Parameter, die für den Verkehrsfluss nur geringfügige Auswirkungen haben, für die Sicherheitsbetrachtung elementar. Zusätzlich ist die Berücksichtigung der Fahrdynamik von Einzelfahrzeugen für die Verkehrssicherheit entscheidend, die hohe Genauigkeitsanforderungen an die mikroskopische Modellierung stellt. Auch wenn mittlerweile in der Verkehrssicherheitsanalyse zunehmend Kalibrierungsmethoden Einzug finden, sind diese Aspekte bislang nur zum Teil aufgegriffen worden. Daran knüpft die hier vorliegende Arbeit an, indem Kalibrierungsansätze für die Verkehrssicherheitsanalyse unter Berücksichtigung verkehrlicher Kenngrößen erarbeitet werden. Als Ausgangslage dient ein bereits bestehendes mikroskopisches Verkehrsflusssimulationsmodell. Für Verkehrssicherheitsanalysen wird die Verkehrskonflikttechnik und das darauf basierende Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) herangezogen, das nicht nur Konflikte in mikroskopischen Modellen detektiert, sondern dazu auch Kenngrößen zur Bewertung des Konfliktes berechnet. Anhand der aus diesen beiden Modellen generierten Daten werden je nach Anwendungsfall unterschiedliche Auswertungen zum Verkehrsfluss und zur Verkehrssicherheit durchgeführt. Vorrangig kommt ein skriptbasiertes zweistufiges Verfahren zur Anwendung, mit dem zuerst verkehrliche Kenngrößen mit Messdaten verglichen und anschließend Analysen zu den im Netz auftretenden Konflikten durchgeführt werden. Für einzelne Teilstudien werden zusätzliche Daten zur Fahrdynamik der Fahrzeuge extrahiert und aufbereitet. Am Beginn steht eine iterative Adaptierung des Modells, um eine solide Grundlage für die Verkehrssicherheitsanalysen zu gewährleisten. Forciert wird dabei vorrangig die Kalibrierung verkehrlicher Kenngrößen sowie eine Reduktion sicherheitsrelevanter Modellungenauigkeiten in Kombination mit einer Erweiterung des Untersuchungsgebietes. Auf Basis des revidierten Modells werden anschließend anhand ausgewählter sicherheitsspezifischer Themenbereiche durch gezielte Parametrierung unterschiedliche Szenarien generiert und variiert. Diese umfassen Parameterstudien zum Fahrverhalten von motorisiertem Verkehr und Fahrradverkehr, nicht regelkonformes Verhalten und erhöhte Verkehrsbelastung. Zusätzlich werden Detailstudien hinsichtlich der Sichtweitenproblematik in beengten Verhältnissen und fahrdynamischer Rahmenbedingungen in Kurvenfahrten an ausgewählten Knotenpunkten durchgeführt.

Abstract

Calibration of a traffic flow simulation subject to vehicle trajectories for traffic safety analysis

127 pages, 182 figures, 45 tables

In recent years traffic safety has become more important in microscopic traffic flow simulation and calibration. Even if the methodology for the calibration of traffic flow parameters is well-established, it is not directly transferable to traffic safety issues, because they require a different parameter setting. For example, parameters which have no significant effect on traffic flow results can have a decisive impact on traffic safety assessment. Furthermore, driving dynamics of vehicles need to be considered in safety related studies and demand a higher level of detail in microscopic models. Even though calibration methods are increasingly included in traffic safety analysis, some of these aspects are still unconsidered. This subject is taken into account in this thesis which proposes calibration methods for traffic safety analysis under consideration of traffic flow parameters. The study is performed using an existing microscopic traffic flow simulation model. For the analysis of traffic safety issues, the traffic conflict method and the Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) which detects conflicts and calculates their surrogate measures for their evaluation has been applied. With the generated data of these two models different evaluations for traffic flow and safety are conducted. In most cases a script based two-step procedure has been applied. First a comparison of traffic flow simulation and field data is performed, whereas secondly the conflict data is analyzed. Some of the sub studies require an extraction and preparation of additional data regarding the driving dynamics of the vehicles. The initial steps of this study comprise an iterative adaption of the model in order to generate a solid base for further analysis regarding traffic safety. Therefore, a calibration of traffic flow parameters is performed, model inaccuracies which have a crucial impact on safety analysis are reduced and the investigation area is expanded. Based on the overviewed model different scenarios regarding selected traffic safety issues are developed and varied with specific parameter settings. These include parameter studies for driving behavior of motorized vehicles and bicycles, deviant behavior and an increase of traffic flow. Furthermore, detailed studies with parameter settings for the investigation of visibility and driving dynamics in curves at a selected intersection are performed.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungen.....	xi
1 Einleitung.....	1
2 Verkehrssicherheit.....	3
2.1 Methodische Ansätze der Verkehrssicherheitsanalyse.....	4
2.2 Verkehrskonflikttechnik	6
3 Verkehrskonfliktanalyse im mikroskopischen Verkehrsmodell	11
3.1 Mikroskopische Verkehrsflussmodelle.....	11
3.1.1 Fahrzeugfolgeverhalten	12
3.1.2 Fahrstreifenwechselfverhalten	14
3.2 Surrogate Safety Assessment Model – SSAM.....	15
3.2.1 Ersatzgrößen	15
3.2.2 Algorithmus.....	23
3.2.3 Konfliktauswertung	25
3.3 Kalibrierung von Verkehrsflussmodellen unter Berücksichtigung von Konflikten.....	26
3.3.1 Kalibrierung verkehrlicher Parameter.....	26
3.3.2 Kalibrierung verkehrlicher Parameter hinsichtlich Konflikte	29
4 Methodische Vorgehensweise	31
4.1 Untersuchungsmethode.....	31
4.2 Aufbereitung der Daten.....	32
4.2.1 Messdaten Verkehrsbelastung.....	33
4.2.2 Messdaten Reisezeit	36
4.2.3 Verkehrliche Daten aus VISSIM.....	38
4.2.4 Konfliktdaten aus SSAM	39
4.3 Skriptbasierte Umsetzung der Datenanalyse und Simulation.....	40
4.4 Generierung der Szenarien.....	42
4.4.1 Versuchsplan	42
4.4.2 Verkehrsmodell Wickenburggasse (REF V0)	43

4.4.3	Simulationsfrequenz (REF V0)	48
4.4.4	Wunsch- und Maximalbeschleunigung (REF V1)	51
4.4.5	Netzanpassungen (REF V2)	54
4.4.6	Netzerweiterung Lendplatz (REF V3)	68
5	Analyse sicherheitsrelevanter Parametervariationen	80
5.1	Parameterstudien	80
5.1.1	Fahrverhalten (REF V2)	80
5.1.2	Fahrradverkehr (REF V3 RF)	96
5.1.3	Nicht regelkonformes Verhalten (REF V3 NRKV)	101
5.1.4	Zuflusserhöhung (REF V3 +q)	104
5.2	Sichtweitenuntersuchung	108
5.3	Fahrdynamik	119
6	Fazit	124
6.1	Zusammenfassung Modellgenerierung	124
6.2	Zusammenfassung Verkehrssicherheitsanalysen	124
6.3	Ausblick	125
7	Literaturverzeichnis	128
8	Anhang	132
8.1	Ergebnisse	132
8.1.1	Verkehrsbelastung	132
8.1.2	Reisezeit	138
8.1.3	Konfliktanzahl	144
8.1.4	Konfliktkenngößen	147
8.1.5	Beschleunigungsverläufe	155
8.2	Routenentscheidungen	156
8.2.1	Motorisierter Verkehr	156
8.2.2	Fahrradverkehr	161
8.3	ÖPNV	163
8.4	Einstellungen der Fahrverhaltensparameter	166

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verkehrssystem und dessen Umweltfaktoren (Schnieder und Schnieder, 2013)	3
Abbildung 2: Methoden der Verkehrssicherheitsuntersuchung (KfV, 2014)	5
Abbildung 3: Konfliktpyramide nach Hydén (Haberl et al., 2018).....	7
Abbildung 4: Folgemodell Wiedemann (1974) [eigene Darstellung]	13
Abbildung 5: Zonen des Fahrstreifenwechsel nach Gipps (Detering, 2011)	15
Abbildung 6: Konfliktkenngrößen (Gettman und Head, 2003)	16
Abbildung 7: Konfliktwinkel in Grad und Uhrzeitformat (Gettman et al., 2008)	19
Abbildung 8: Konflikttyp in Abhängigkeit des Konfliktwinkels (Gettman et al., 2008)	19
Abbildung 9: Konflikt mit Bewegungstrajektorien	21
Abbildung 10: Konfliktparameter und Modellsituationen	22
Abbildung 11: Geschwindigkeitsvektoren während des Konfliktereignisses aus Simulation	23
Abbildung 12: Distanzberechnung (Gettman et al., 2008).....	24
Abbildung 13: Iterative Berechnung von TTC (Gettman et al., 2008)	25
Abbildung 14: Kalibrierungs- und Validierungsverfahren nach FGSV (2006) [vereinfachte Darstellung]	27
Abbildung 15: Zweistufiges Kalibrierungsverfahren (Huang et al., 2013).....	30
Abbildung 16: Ablauf der Untersuchung.....	32
Abbildung 17: Untersuchungsgebiet Wickenburggasse.....	33
Abbildung 18: Zählstellen Keplerbrücke	35
Abbildung 19: Zählstellen Geidorfplatz.....	35
Abbildung 20: Messwerte Zählstellen.....	36
Abbildung 21: Reisezeitabschnitte	37
Abbildung 22: Reisezeitmessungen mit und ohne Ausreißer	38
Abbildung 23: Pakete in Python	40
Abbildung 24: Flussdiagramm Python zur Simulation und Auswertung.....	41
Abbildung 25: Überblick über die Szenarien	43
Abbildung 26: Netz Wickenburggasse.....	44
Abbildung 27: REF V0 - Verkehrsstärke	45
Abbildung 28: REF V0 - Reisezeit.....	46
Abbildung 29: REF V0 - Konflikanzahl	46
Abbildung 30: REF V0 - TTC und PET	47

Abbildung 31: REF V0 - Konflikte im Netz	48
Abbildung 32: REF V0 Simulationsfrequenz - Vergleich Verkehrsstärke.....	49
Abbildung 33: REF V0 Simulationsfrequenz - Vergleich Reisezeit.....	49
Abbildung 34: REF V0 Simulationsfrequenz - Vergleich Konflikanzahl	50
Abbildung 35: REF V0 Simulationsfrequenz - Vergleich TTC und PET	51
Abbildung 36: Wunschbeschleunigung Default und GAVe	52
Abbildung 37: REF V1 - Vergleich Verkehrsstärke.....	52
Abbildung 38: REF V1 - Vergleich Reisezeit.....	53
Abbildung 39: REF V1 - Vergleich Konflikanzahl	53
Abbildung 40: REF V1 - Vergleich TTC und PET	54
Abbildung 41: Signalgruppen der VLSA 503 vor Bearbeitung.....	55
Abbildung 42: Übersichtsplan VLSA 503 (ibv Fallast, 2015).....	55
Abbildung 43: Signalprogramm (ibv Fallast, 2015)	56
Abbildung 44: Darstellung der Querverkehrsstörung (PTV, 2016)	57
Abbildung 45: Querverkehrsstörung 14.....	57
Abbildung 46: Querverkehrsstörung 17	59
Abbildung 47: Routenentscheidung Keplerbrücke	60
Abbildung 48: ÖV-Linienführung Lendplatz	61
Abbildung 49: Streckenaufweitung Humboldtstraße	62
Abbildung 50: Streckenanpassung Kaiser-Franz-Josef-Kai.....	62
Abbildung 51: Konfliktpunkt Körösisstraße	63
Abbildung 52: Konfliktpunkt Fußgänger Geidorfplatz.....	63
Abbildung 53: Geometrische Netzanpassung	64
Abbildung 54: Höhenschichtlinien zur Anpassung der z-Koordinaten.....	65
Abbildung 55: REV V2 - Verkehrsstärke	66
Abbildung 56: REF V2 - Reisezeit.....	66
Abbildung 57: REV V2 -Konflikanzahl.....	67
Abbildung 58: REV V2 - TTC und PET.....	68
Abbildung 59: REF V2 - Konflikte im Netz	68
Abbildung 60: Netzerweiterung Lendplatz	69
Abbildung 61: Strecken Lendplatz.....	69
Abbildung 62: Netzerweiterung Lendplatz mit Radverkehrsanlage	72
Abbildung 63: Wartebereich Neubaugasse.....	73

Abbildung 64: Signalgruppen der VLSA 505	74
Abbildung 65: Knotenströme der VLSA 505	74
Abbildung 66: Signalprogramm der VLSA 505	75
Abbildung 67: Signalgruppen der VLSA 507	75
Abbildung 68: Phasen der VLSA 507	76
Abbildung 69: Steuerungslogik der VLSA 505	76
Abbildung 70: REF V3 - Verkehrsstärke	77
Abbildung 71: REF V3 - Reisezeit	77
Abbildung 72: REF V3 - Konflikanzahl	78
Abbildung 73: REF V3 - Konflikte im Netz	79
Abbildung 74: REF V3 – TTC und PET	79
Abbildung 75: Folgeparameter nach Wiedemann 99 (Hoffmann, 2013).....	82
Abbildung 76: Defaultwerte Wiedemann 74 und Wiedemann 99 - Vergleich Konflikanzahl.....	83
Abbildung 77: Defaultwerte Wiedemann 74 und Wiedemann 99 - Vergleich TTC und PET	84
Abbildung 78: Defaultwerte Wiedemann 74 und Wiedemann 99 - Vergleich Konflikte im Netz.....	85
Abbildung 79: ax - Vergleich Konflikanzahl.....	87
Abbildung 80: ax - Vergleich TTC und PET.....	88
Abbildung 81: bxadd - Vergleich Konflikanzahl.....	89
Abbildung 82: bxadd - Vergleich TTC und PET	89
Abbildung 83: bxmult - Vergleich Konflikanzahl	90
Abbildung 84: bxmult - Vergleich TTC und PET	91
Abbildung 85: CC0 - Vergleich Konflikanzahl	92
Abbildung 86: CC0 - Vergleich TTC und PET	92
Abbildung 87: CC1 - Vergleich Konflikanzahl	93
Abbildung 88: CC1 - Vergleich TTC und PET	94
Abbildung 89: ObsvdVehs - Vergleich Konflikanzahl	95
Abbildung 90: ObsrvdVehs - Vergleich TTC und PET.....	95
Abbildung 91: Wunschgeschwindigkeit Fahrrad unter der Berücksichtigung der Steigung	98
Abbildung 92: REF V3 RF - Vergleich Konflikanzahl	100
Abbildung 93: REF V3 RF - Vergleich TTC und PET	100
Abbildung 94: REF V3 RF - Vergleich Konflikte im Netz.....	101
Abbildung 95: REF V3 NRKV - Vergleich Konflikanzahl	102
Abbildung 96: REF V3 NRKV - Vergleich TTC und PET	103

Abbildung 97: REF V3 NRKV - Vergleich Konflikte im Netz.....	103
Abbildung 98: REF V3 NRKV - Vergleich Konflikte Neubaugasse	104
Abbildung 99: Messquerschnitte Wickenburggasse	104
Abbildung 100: Signalgruppen VLSA 502	105
Abbildung 101: Signalplan VLSA 502	106
Abbildung 102: REF V3 +q - Vergleich Konflikanzahl	107
Abbildung 103: REF V3 +q - Vergleich TTC und PET	107
Abbildung 104: REF V3 +q - Vergleich Konflikte im Netz	108
Abbildung 105: Sichtweiten in der RVS 03.05.12 (FSV, 2007).....	108
Abbildung 106: Strecken Knoten Laimburggasse/Wickenburggasse	109
Abbildung 107: Sichtweiten am Knoten Laimburggasse/Wickenburggasse	110
Abbildung 108: Parameter Sichtbarkeit Strecke (PTV, 2016).....	111
Abbildung 109: Langsamfahrbereiche am Knoten Laimburggasse/Wickenburggasse	111
Abbildung 110: Distanzmessung Laimburggasse	112
Abbildung 111: Vergleich Bewegungstrajektorien mit und ohne Parametrierung der Konfliktfläche	114
Abbildung 112: REF V3 - Geschwindigkeitsverlauf Laimburggasse	116
Abbildung 113: REF V3 KF - Geschwindigkeitsverlauf Laimburggasse	117
Abbildung 114: REF V3 LFB - Geschwindigkeitsverlauf Laimburggasse	118
Abbildung 115: Vergleich Konflikte Laimburggasse	118
Abbildung 116: Kräfte in Kurvenfahrt	119
Abbildung 117: Strecken und Radien Laimburggasse	120
Abbildung 118: REF V3 - Geschwindigkeitsverlauf Strecke 10062	122
Abbildung 119: REF V3 FD - Geschwindigkeitsverlauf Strecke 10062	123
Abbildung 120: Vergleich Konflikte Laimburggasse	123
Abbildung 121: REF V1 - Vergleich Messung und Simulation der Verkehrsstärke mit GEH-Fehlermaß	132
Abbildung 122: REF V2 - Vergleich Messung und Simulation der Verkehrsstärke mit GEH-Fehlermaß	132
Abbildung 123: REF V3 RF (Fahrradverkehr) - Vergleich Messung und Simulation der Verkehrsstärke mit GEH-Fehlermaß	133
Abbildung 124: REF V3 NRKV (Nicht regelkonformes Verhalten) - Vergleich Messung und Simulation der Verkehrsstärke mit GEH-Fehlermaß	133
Abbildung 125: REF V3 +q (Zuflusserhöhung) - Vergleich Messung und Simulation der Verkehrsstärke mit GEH-Fehlermaß	133

Abbildung 126: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation ax	134
Abbildung 127: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation bxadd	134
Abbildung 128: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation bxmult.....	134
Abbildung 129: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CC0.....	135
Abbildung 130: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CC1.....	135
Abbildung 131: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CC2.....	136
Abbildung 132: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CC3.....	136
Abbildung 133: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CC4/CC5.....	136
Abbildung 134: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CC6.....	137
Abbildung 135: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation ObsrvdVehs.....	137
Abbildung 136: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation MinHdwy	137
Abbildung 137: Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CoopDecel.....	138
Abbildung 138: Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation SafDistFactLnChg	138
Abbildung 139: REF V1 - Vergleich Messung und Simulation der Reisezeit mit RMSPE-Fehlermaß ..	138
Abbildung 140: REF V2 - Vergleich Messung und Simulation der Reisezeit mit RMSPE-Fehlermaß ..	139
Abbildung 141: REF V3 RF (Fahrradverkehr) - Vergleich Messung und Simulation der Reisezeit mit RMSPE-Fehlermaß.....	139
Abbildung 142: REF V3 NRKV (Nicht regelkonformes Verhalten) - Vergleich Messung und Simulation der Reisezeit mit RMSPE-Fehlermaß.....	139
Abbildung 143: REF V3 +q (Zuflusserhöhung) - Vergleich Messung und Simulation der Reisezeit mit RMSPE-Fehlermaß.....	140
Abbildung 144: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation ax	140
Abbildung 145 REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation bxadd.....	140
Abbildung 146: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation bxmult	141
Abbildung 147: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CC0	141
Abbildung 148: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CC1	141
Abbildung 149: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CC2	142
Abbildung 150:REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CC3	142
Abbildung 151: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CC4/CC5.....	142
Abbildung 152: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CC6	143
Abbildung 153: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation ObsrvdVehs	143
Abbildung 154: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation MinHdwy	143
Abbildung 155: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CoopDecel	144
Abbildung 156: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation SafDistFactLnChg....	144

Abbildung 157: REF V2 - Vergleich Konfliktnzahl mit Parametervariation CC2	144
Abbildung 158: REF V2 - Vergleich Konfliktnzahl mit Parametervariation CC3	145
Abbildung 159: REF V2 - Vergleich Konfliktnzahl mit Parametervariation CC4/CC5.....	145
Abbildung 160: REF V2 - Vergleich Konfliktnzahl mit Parametervariation CC6	145
Abbildung 161: REF V2 - Vergleich Konfliktnzahl mit Parametervariation MinHdwy	146
Abbildung 162: REF V2 - Vergleich Konfliktnzahl mit Parametervariation CoopDecel	146
Abbildung 163: REF V2 - Vergleich Konfliktnzahl mit Parametervariation SafDistFactLnChg.....	146
Abbildung 164: REV V0/V1/V2–Vergleich Konfliktkenngrößen	147
Abbildung 165: REF V0 –Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation der Simulationsfrequenz.....	147
Abbildung 166: REF V3 – Konfliktkenngrößen nach Modus.....	148
Abbildung 167: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation ax	148
Abbildung 168: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation bxadd.....	149
Abbildung 169: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation bxmult	149
Abbildung 170: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CC0	150
Abbildung 171: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CC1	150
Abbildung 172: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CC2	151
Abbildung 173: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CC3	151
Abbildung 174: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CC4/CC5.....	152
Abbildung 175: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CC6	152
Abbildung 176: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation ObsrVdVehs	153
Abbildung 177: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation MinHdwy	153
Abbildung 178: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CoopDecel	154
Abbildung 179: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation SafFactLnChg	154
Abbildung 180: Beschleunigungsverlauf der Fahrzeuge auf Strecke 13 ohne gesonderte Parametrierung	155
Abbildung 181: Beschleunigungsverlauf der Fahrzeuge auf Strecke 13 mit Parametrierung der Konfliktflächen	155
Abbildung 182_: Beschleunigungsverlauf der Fahrzeuge auf Strecke 13 mit Parametrierung der Langsamfahrbereiche	156

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Konfliktschweregrade (Lohse und Schnabel, 2011).....	7
Tabelle 2: Konflikttypen (FSV, 1995)	9
Tabelle 3: Konfliktschweregrade anhand der Deceleration Rate (Hupfer, 1997)	18
Tabelle 4: Fehlermaße (Detering, 2011).....	28
Tabelle 5: Überblick Zählstellen	34
Tabelle 6: Filterbedingungen in SSAM	39
Tabelle 7: Gründauern VLSA 504 vor und nach Bearbeitung.....	56
Tabelle 8: Querverkehrsstörung 14.....	58
Tabelle 9: Querverkehrsstörung 17.....	58
Tabelle 10: Zuflüsse Keplerstraße REF V0	70
Tabelle 11: Zuflüsse Lendplatz REF V3	70
Tabelle 12: Routenentscheidung 3 vor und nach Netzerweiterung	71
Tabelle 13: Zuflüsse Fahrradverkehr	73
Tabelle 14: Abweichungen bezüglich Anzahl der Gesamtkonflikte	86
Tabelle 15: Zuflüsse Fahrradverkehr	96
Tabelle 16: Routenentscheidung Fahrradverkehr REF V3 RF.....	97
Tabelle 17: Wunschgeschwindigkeit Fahrrad.....	97
Tabelle 18: Folgeparameter Fahrradverkehr	99
Tabelle 19: Rotlichtmissachtung	101
Tabelle 20: VLSA 502 Gründauer.....	105
Tabelle 21: Querschnittsmessungen Wickenburggasse.....	106
Tabelle 22: Sichtweiten im Ortsgebiet (Lohse und Schnabel, 2011).....	109
Tabelle 23: Kenngrößen Konflikt 1491	112
Tabelle 24: Reibungsbeiwerte nach Bodenbeschaffenheit und Witterung (Burg, 2017)	120
Tabelle 25: Höchstgeschwindigkeiten in der Kurve	121
Tabelle 26: Wunschgeschwindigkeitsverteilung für Kurvenfahrt	121
Tabelle 27: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 1 in den Szenarien REF V0 und REF V3	156
Tabelle 28: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 2 in den Szenarien REF V0 und REF V3	157

Tabelle 29: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 3 in den Szenarien REF V0 und REF V3	157
Tabelle 30: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 4 in den Szenarien REF V0 und REF V3	158
Tabelle 31: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 5 in den Szenarien REF V0 und REF V3	158
Tabelle 32: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 6 in den Szenarien REF V0 und REF V3	159
Tabelle 33: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 7 in den Szenarien REF V0 und REF V3	159
Tabelle 34: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 8 in den Szenarien REF V0 und REF V3	160
Tabelle 35: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 9 in den Szenarien REF V0 und REF V3	160
Tabelle 36: Relative Belastung der Routenentscheidung 24 im Szenario REF V3.....	161
Tabelle 37: Relative Belastung der Routenentscheidung 25 im Szenario REF V3.....	161
Tabelle 38: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 14 für den Fahrradverkehr in den Szenarien REF V0 und REF V3.....	161
Tabelle 39: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 15 für den Fahrradverkehr in den Szenarien REF V0 und REF V3.....	162
Tabelle 40: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 16 für den Fahrradverkehr in den Szenarien REF V0 und REF V3.....	162
Tabelle 41: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 17 für den Fahrradverkehr in den Szenarien REF V0 und REF V3.....	162
Tabelle 42: ÖV-Linien im Verkehrsmodell REF V0.....	163
Tabelle 43: ÖV-Haltestellen im Verkehrsmodell REF V0 (Linien 4,5,39,41).....	164
Tabelle 44: ÖV-Haltestellen im Verkehrsmodell REF V0 (Linien 58, 63).....	165
Tabelle 45: Übersicht der eingestellten Fahrverhaltensparameter.....	166

Abkürzungen

FFE	Fahrer-Fahrzeug-Einheit
*.att	Dateiendung Attributdatei
*.csv	Datei endung csv-Datei (Comma-separated values)
*.fzp	Dateiendung Fahrzeugprotkoll
*.png	Dateiendung png-Datei (Portable Network Graphics)
*.py	Dateiendung Python-Datei
COM	Component Object Model
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
FD	Fahrdynamik
Fzg	Fahrzeug
KF	Konfliktfläche
LFB	Langsamfahrbereich
Lkw	Lastkraftwagen
MIV	motorisierter Individualverkehr
NRKV	nicht regelkonformes verhalten
ÖV/ÖPNV	Öffentlicher Verkehr / Öffentlicher Personennahverkehr
PET	Post Encroachment Time
PKW	Personenkraftwagen
RF	Radfahrer
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
SSAM	Surrogate Safety Assessment Model
TTC	Time to Collision
VAP	Verkehrsabhängige Programmierung
VLSA/LSA	Verkehrslichtsignalanlage

1 Einleitung

Der kontinuierliche Anstieg des Verkehrsaufkommens in den letzten Jahrzehnten hat nicht nur für neue Herausforderungen bezüglich Kapazitäten und Nachhaltigkeit gesorgt, sondern auch der Verkehrssicherheit einen erhöhten Stellenwert verschafft. Eine besondere Bedeutung wird diesen Entwicklungen zufolge den methodischen Ansätzen der Verkehrssicherheitsanalyse eingeräumt. Die bis heute praktizierte Untersuchung historischer Unfalldaten ist als alleinige Methode obsolet. Nach dieser Vorgehensweise wird die Datengenerierung erst nach Implementierung der Straßenverkehrsanlage und nach bereits eingetretenen Unfällen möglich. Maßnahmen, die auf Basis von Unfalldaten entwickelt sind, können somit immer nur reaktiv im Nachhinein gesetzt werden. Unfälle sind nicht nur höchst seltene Ereignisse, die durch das Zusammenwirken unterschiedlicher Einflüsse entstehen, sondern sie verursachen in vielen Fällen auch einen Schaden. Folglich ist die Datenerhebung mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Aus diesen Überlegungen hat sich ergänzend zu dem reaktiven der proaktive Ansatz der Verkehrskonflikttechnik entwickelt, deren Datengrundlage Verkehrskonflikte sind. Diese entstehen, wenn zwei oder mehrere Fahrer sich zeitlich und räumlich soweit annähern, dass ohne Bewegungsänderung der Beteiligten, die Gefahr einer Kollision gegeben ist (Hydén, 1996). Einhergehend mit der Begriffsbestimmung haben sich auch Kenngrößen etabliert, anhand denen ein Konfliktereignis nicht nur definiert und bewertet werden kann, sondern auch messbar wird. Die Datenerhebung anhand dieser Kenngrößen wird nicht nur durch das häufigere Auftreten von Konflikten begünstigt, sondern kann bereits im Vorfeld durchgeführt werden. Dafür stellt die Verkehrsmodellierung, insbesondere die mikroskopische Verkehrsflusssimulation, die den Verkehrsablauf von Einzelfahrzeugen abbildet, ein geeignetes Werkzeug dar. Aufbauend auf deren Ergebnisse können Konflikte mit dem häufig eingesetzten Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) detektiert und bewertet werden. In Zusammenhang mit diesen Modellen steht auch die Kalibrierung, mit der durch Parametrierung eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Realität und Simulation angestrebt wird. Während die Verkehrsflusssimulation bereits über eine gut fundierte Kalibrierungsmethodik verfügt, ist diese in der Verkehrssicherheitsanalyse noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Das beruht darauf, dass die Analyse sicherheitsrelevanter Aspekte eine andere Parametrierung benötigt. Einstellungen, die für verkehrliche Untersuchungen irrelevant sind, können wesentliche Auswirkungen auf Verkehrskonflikte haben. Zudem spielt die Fahrdynamik eine erhebliche Rolle und erfordert damit ein höheres Genauigkeitsniveau in mikroskopischen Verkehrsflussmodellen sowie bei den daraus generierten Fahrzeugtrajektorien. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dieser Thematik, in dem mögliche Ansätze zur Kalibrierung für die Verkehrssicherheit unter Berücksichtigung verkehrlicher Kenngrößen diskutiert werden. Dafür wird im Wesentlichen zunächst das mikroskopische Verkehrsflussmodell an reale Verhältnisse iterativ angepasst, um eine solide Grundlage für weitere Analysen zu schaffen. Anschließend werden anhand ausgewählter sicherheitsspezifischer Themenschwerpunkte mittels gezielter Parametrierung unterschiedliche Szenarien generiert und variiert. Ein kurzer Überblick über den Inhalt dieser Arbeit wird in Folge dargelegt.

Das zweite Kapitel beschäftigt sich allgemein mit der Thematik der Verkehrssicherheit und den damit verbundenen Grundströmungen der Verkehrssicherheitsanalyse. Dabei werden die wesentlichen Methoden der reaktiven und proaktiven Ansätze vorgestellt und detailliert auf die Verkehrskonflikttechnik eingegangen. Im dritten Kapitel werden die Werkzeuge für die hier durchgeführte Studie beschrieben. Behandelt werden unterschiedliche Modellierungsstufen mit Fokus auf mikroskopische Verkehrsflusssimulation und grundlegende Modelle des Längs- und Querverhaltens. Der zweite Teil dieses Kapitels beschäftigt sich mit dem Surrogate Safety Assessment Model, wobei wesentliche Konfliktkenngrößen

beschrieben und diskutiert werden. Außerdem wird kurz auf den Berechnungsalgorithmus eingegangen und grundlegende Methoden zur Auswertung in SSAM dargelegt. Der letzte Abschnitt beschäftigt sich mit der Kalibrierung von Verkehrsflussmodellen unter Berücksichtigung der Verkehrskonflikttechnik. Vorgestellt werden dabei die wichtigsten Fehlermaße sowie deren Anwendung, bereits durchgeführte Studien zur Kalibrierung von verkehrlichen Kenngrößen und letztendlich Kalibrierungsansätze aus sicherheitsbezogenen Untersuchungen. Die methodische Vorgehensweise in Kapitel 4 behandelt zunächst eine Beschreibung der Untersuchungsmethode, in der die prinzipielle Vorgehensweise erläutert wird. Im Anschluss daran wird die Aufbereitung der Daten behandelt, wobei auf die Messdaten und ihre Generierung sowie auf die Extraktion und Aufbereitung der Simulationsdaten eingegangen wird. Im zweiten Abschnitt wird der Prozess der Szenariengenerierung beschrieben und erste Ergebnisse zu den Hauptszenarien hinsichtlich verkehrlicher und konfliktbezogener Kenngrößen diskutiert. Das fünfte Kapitel beschäftigt sich mit sicherheitsspezifischen Fragestellungen und behandelt die dazu durchgeführten Teilstudien. Diese umfassen zunächst Parameterstudien, in denen Parameter einzeln oder in Kombination untersucht werden. Neben dem Fahrverhalten des motorisierten Verkehrs und des Fahrradverkehrs werden hier auch nicht regelkonformes Verhalten und eine lokal begrenzte Belastungserhöhung behandelt. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Sichtweitenproblematik, wofür anhand von Richtlinien aus dem Straßenentwurf Möglichkeiten zur Modellierung unübersichtlicher Knotenpunkte gegenübergestellt werden. Der letzte Abschnitt umfasst die Untersuchung der Fahrdynamik in Kurvenfahrten. Den theoretischen Rahmen bilden dabei Kenntnisse aus der Mechanik, die als Grundlage für die fahrdynamische Adaptierung im Modell herangezogen werden. Zum Abschluss werden die wichtigsten Aspekte dieser Arbeit noch einmal zusammengefasst. Dabei wird auf wesentliche Erkenntnisse eingegangen und mögliche daraus resultierende Konsequenzen für zukünftige Verkehrssicherheitsanalysen diskutiert.

2 Verkehrssicherheit

Verkehrssicherheit ist ein zentrales Thema der Verkehrsplanung und zählt neben verkehrsflussrelevanten Aspekten zu den maßgebenden Gütekriterien eines Verkehrssystems. Sie gibt den Grad der Zuverlässigkeit der Verkehrsmittel und –anlagen dafür an, dass keine Gefährdung und Unfälle im Verkehrsablauf auftreten. (Lohse und Schnabel, 2011)

Verkehrssysteme sind gegenüber anderen technischen Systemen deutlich mehr durch unterschiedliche Einflussfaktoren geprägt, die aus Politik, Wissenschaft, Technik, Umwelt, Wirtschaft und schließlich den Menschen selbst resultieren. Diese Charakteristik des Verkehrs schlägt sich auch in dem Anspruch an die Verkehrssicherheit nieder. Sie kann folglich nicht einem Ursache-Wirkungsprinzip untergeordnet werden, sondern ist vielmehr in ein Gefüge von gesellschaftlichen, technischen und individuellen Rahmenbedingungen einzubetten. (Schnieder und Schnieder, 2013)

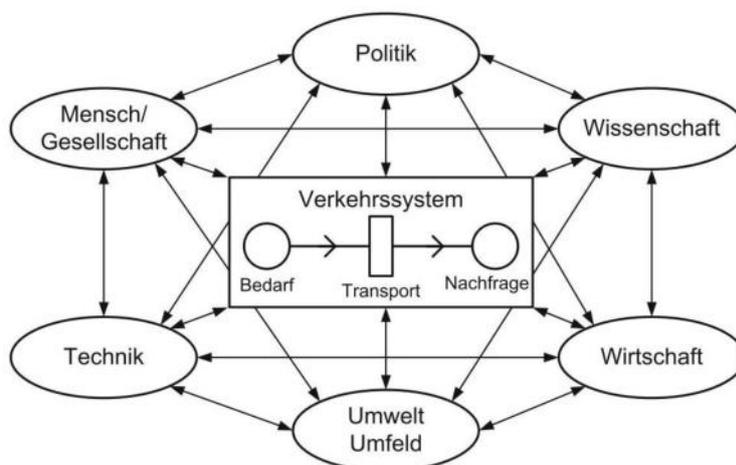


Abbildung 1: Verkehrssystem und dessen Umweltfaktoren (Schnieder und Schnieder, 2013)

Aus diesem komplexen Beziehungsgeflecht des Verkehrssystems resultiert ein großer Handlungsspielraum für die einzelnen Verkehrsteilnehmer, der zwar ein hohes Maß an Mobilität erlaubt, aber die Gewährleistung von Sicherheit wesentlich erschwert. Denn die Sicherheit einer Straßenverkehrsanlage ist letztendlich von den Nutzern dieser abhängig. Diese menschliche Interaktion birgt jedoch Risiken, da die Beteiligten nicht immer in der erwartenden Weise handeln. (Schnieder und Schnieder, 2013)

Ein hohes Maß an Verkehrssicherheit und damit die Vermeidung von Unfällen ist nicht nur aus offensichtlich ethischen Gründen erstrebenswert, sondern bedeutet auch gleichzeitig die Vermeidung hoher volkswirtschaftlicher Verluste (Schnieder und Schnieder, 2013). Folglich ist die Verbesserung der Verkehrssicherheit ein wesentliches politisches Bestreben sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene.

Das im Jahr 2001 veröffentlichte Weißbuch Verkehr (Europäische Kommission, 2001) zielte auf eine Reduktion der Unfälle mit Personenschaden ab. Forciert wurden 50 % weniger Verkehrstote, 40 % weniger Schwerverletzte und 20 % weniger Unfälle mit Personenschaden bis 2020. Im Zuge einer Zwischenbilanz des Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) (2017) zeigte sich, dass Österreich durch die gesetzten Maßnahmen die Zwischenziele nicht ganz erreichen konnte. Das Weißbuch Verkehr von 2011 (Europäische Kommission, 2011) fordert hingegen bezüglich der Verkehrssicherheit eine *Vision Zero*, also eine Senkung der Unfalltoten nahe Null bis zum Jahr 2050. Fokussiert wird neben Ausbildung und Sensibilisierung aller Verkehrsteilnehmer, der Strategie für

Maßnahmen bezüglich Straßenverkehrsunfälle, besonderer Schutz von gefährdeten Verkehrsteilnehmern auch die Harmonisierung und Anwendung von Technologien für die Straßenverkehrssicherheit. Automatisierung und Vernetzung schaffen Möglichkeiten menschliches Versagen zu kompensieren und können damit längerfristig zu mehr Sicherheit führen. Allerdings schafft die Übergangssituation von konventionellen zu automatisierten Fahrzeugen ein zusätzliches Risikopotenzial, das zu minimieren ist (Europäische Kommission, 2018). Die Europäische Charta der Straßenverkehrssicherheit (European Road Safety Charter) ist eine freiwillige Selbstverpflichtung der Unterzeichner an der Reduktion der Verkehrsunfallzahlen mitzuwirken (Europäische Kommission, 2011). Auf der globalen Ebene sind Maßnahmenpläne der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zu nennen. Sie beinhalten die Durchführung einer ersten Ministerkonferenz zur Straßenverkehrssicherheit im Jahre 2009 und die Ausrufung der Jahre 2010 bis 2020 als Jahrzehnt der Verkehrssicherheit (Schnieder und Schnieder, 2013). Ebenso umfasst die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung (2030 Agenda for Sustainable Development) der Vereinten Nationen aus dem Jahr 2015 Zielsetzungen für die Verkehrssicherheit. Neben einer Halbierung der tödlichen Unfälle bis 2020 wird angestrebt, bis 2030 den Zugang zu einem sicheren, bezahlbaren, zugänglichen und nachhaltigen Verkehrssystem zu ermöglichen und die Straßenverkehrssicherheit insbesondere für ungeschützte Verkehrsteilnehmer zu verbessern. (UNDSS, 2018)

2.1 Methodische Ansätze der Verkehrssicherheitsanalyse

Aufgrund der Bestrebung, die Verkehrssicherheit stets zu erhöhen, erlangt auch die Verkehrssicherheitsanalyse einen zentralen Stellenwert. Bedingt durch die besondere Charakteristik von Verkehrssicherheit und deren Erhebung haben sich unterschiedliche Ansätze und Methoden in den letzten Jahrzehnten entwickelt, die sich in zwei wesentliche Grundströmungen unterteilen lassen.

- **Reaktiv / Analytisch-retrospektiv:** Darunter werden Ansätze verstanden, die anhand historischer Ereignisse ein „lernen für die Zukunft“ forcieren. Methodisch kommen meist wissenschaftliche Bestandsaufnahmen und Fallstudien, die zum Zweck einer Häufigkeitsanalyse oder zur Klassifizierung durchgeführt werden. Die daraus resultierenden Maßnahmen sind meist Ursachen- und Symptombehandlung.
- **Proaktiv / Synthetisch-prospektiv:** dabei werden notwendige Transportfunktionen bereits von Beginn an sicherheitsgerichtet konstruiert. Mit Hilfe immer leistungsfähigerer Informationsbearbeitung kann das sichere Verkehrsgeschehen darüber hinaus aktiv geplant und gesteuert werden. (Schnieder und Schnieder, 2013)

In der Praxis bedeutet dies, das zur Bewertung der Verkehrssicherheit in der reaktiven Herangehensweise meist historische Unfalldaten herangezogen werden. Diese können folglich erst dann erhoben werden, wenn die Verkehrsanlage schon eine gewisse Zeit in Betrieb ist. Offenbart sich eine Anlage aufgrund der Datenlage als Unfalhhäufungspunkt, so können Maßnahmen getroffen werden, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Eine klassische Methode des reaktiven Ansatzes stellt somit die Erhebung und Analyse von Unfalldaten dar, die in der RVS 02.02.21 mit dem Titel Verkehrssicherheitsuntersuchung (FSV, 2014) verankert ist. Es handelt sich dabei um Richtlinien zur Beschreibung von Unfällen in ihren örtlichen und zeitlichen Rahmenbedingungen, Ermittlung sicherheitsrelevanter Statistiken und Sicherheitsüberprüfungen. Neben der reinen Unfallanalyse sind in der RVS 02.02.21 auch das Unfalhhäufungsstellenmanagement und Elemente der im Rahmen der EU-Richtlinie 2008/9/EG vereinheitlichten Verfahren des Sicherheitsmanagements enthalten (Rose und Eichinger-Vill, 2010). Diese können ebenfalls den beiden Grundströmungen zugeordnet werden und sind in Abbildung 2 dargestellt.

Proaktive Ansätze bezüglich Verkehrssicherheit setzen hingegen bei der Planungsphase an. Analysiert werden dabei beispielsweise geografische Lage, Trassierungsvarianten, Sichtverhältnisse unter Berücksichtigung verschiedener Lichtverhältnisse. Anders als bei reaktiven Ansätzen basiert hier die Argumentation stark auf theoretischen Überlegungen anstelle von erhobenen Daten und führt zu neuen Herausforderungen in der Analysemethodik.

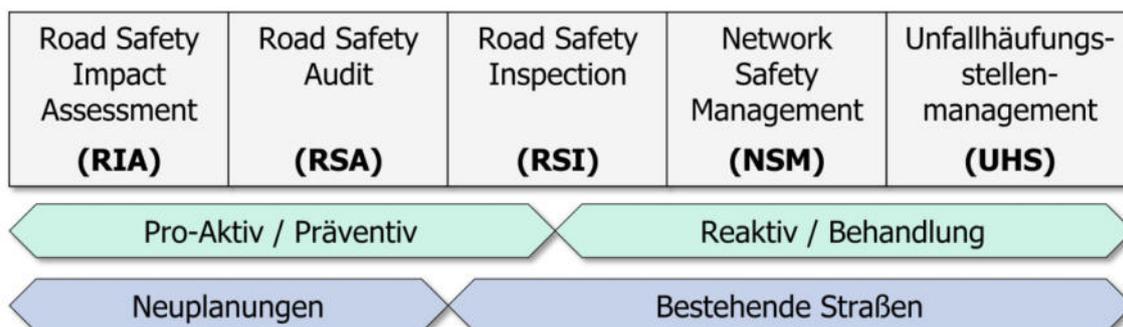


Abbildung 2: Methoden der Verkehrssicherheitsuntersuchung (KfV, 2014)

- Das **Road Safety Impact Assessment (RIA)** oder die Folgenabschätzung für die Verkehrssicherheit forciert eine vergleichende Analyse der Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit bei der Erstellung neuer Straßenbauprojekte oder bei wesentlichen Änderungen bestehender Verkehrsanlagen. Sie ist spätestens mit dem Einreichprojekt dem BMVIT vorzulegen und beeinflusst die Trassenwahl. Ebenso unterliegen diesem Verfahren Neubauprojekte mit einer Abschnittslänge von mindestens drei Kilometer. Wesentlich ist bei der RIA die Definition von Sicherheitszielen, Beschreibung der Ist-Situation und der Nullvariante und, dass die Folgen der verschiedenen Lösungsmöglichkeiten dargestellt werden.
- Das **Road Safety Audit (RSA)** oder Straßenverkehrssicherheitsaudit ist in der RVS 02.02.33 (FSV, 2012) ausgeführt. Hierbei werden Entwurfsmerkmale unabhängig, eingehend, systematisch und technisch unter dem Sicherheitsaspekt geprüft. Es bezieht sich auf Vorprojekt, Einreichprojekt, Bauprojekt sowie die Bauphase und setzt in jeder Phase unterschiedliche Schwerpunkte.
- Die **Road Safety Inspection (RSI)** oder Straßenverkehrssicherheitsüberprüfung ist in der RVS 02.02.34 (FSV, 2012) detailliert ausgeführt und ist eine periodisch wiederkehrende Prüfung der in Betrieb befindlichen Straßenverkehrsanlagen. Diese findet einmal im Jahr statt, wobei alle zehn Jahre eine vertiefte Untersuchung durchgeführt wird. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen werden in ein Protokoll überführt und bei vertieften RSI ist ein Befund mit einem Sanierungsvorschlag aufzuführen.
- Beim **Network Safety Management (NSM)** oder der Straßenverkehrssicherheitsanalyse wird im Untersuchungsgebiet das gesamte Straßennetz in Abschnitte von drei Kilometern unterteilt und auf Sicherheitsaspekte untersucht. Abschnitte mit dem größten Potenzial für die Senkung an Unfallkosten werden von einem Expertenteam mit mindestens einem Gutachter untersucht. Aus dieser Analyse werden Unfalldaten und unfallverhütende Maßnahmen extrahiert.
- Das **Unfallhäufungsstellenmanagement (UHM)** oder auch **Black Spot Management (BSM)** basiert auf der in der RVS 02.02.21 (FSV, 2014) verankerten Unfalldatenanalyse. Im Rahmen dieser werden Unfallberichte erstellt und an die Bundesanstalt Statistik Austria weitergeleitet. Als Unfallhäufungsstellen werden Streckenabschnitte bezeichnet, die in einem Zeitraum von

drei bis fünf Jahren gleichartige Unfälle mit Personen- und Sachschaden aufweisen. Diese werden im Sinne des UHM von der Landesregierung inklusive Maßnahmenplan jährlich in einen Bericht gefasst.

(KfV, 2014; Rose und Eichinger-Vill, 2010)

Für reaktive Ansätze wird die Datengrundlage meist mittels Unfallstatistiken und -auswertungen gebildet. Folglich können Daten nur erhoben werden, wenn die Straßenverkehrsanlage bereits erstellt ist und Unfälle passiert sind. Voraussetzung für die Datenerhebung ist somit, dass bereits ein Personen- und/oder Sachschaden verursacht wurde. Dies ist nicht nur aus ethischen Gründen bedenklich, sondern impliziert auch, dass Unfälle sich nicht als alleinige Datengrundlage eignen. Der Grund dafür liegt in der Charakteristik des Unfalles selbst. Unfälle sind seltene Ereignisse, die keiner rein kausalen Logik folgen, sondern vielmehr durch das Zusammenwirken unterschiedlicher Faktoren bzw. durch eine Kette von Ereignissen entstanden sind (Archer, 2005). Eine ausreichende Menge an Daten ohne Anspruch an Validität erfordert somit grundsätzlich schon einen langen Erhebungszeitraum. Dies kann zur Folge haben, dass auch die Bedingungen unter denen die Unfälle passiert sind, nicht mehr den aktuellen entsprechen. Erschwerend kommt hinzu, dass manche Unfälle unzureichend oder überhaupt nicht dokumentiert werden. Folglich ist eine ausreichend große und valide Datengrundlage, die sich für statistische Auswertungen eignet, mit hohem zeitlichem und finanziellem Aufwand verbunden. (Grayson et al., 1984; McNamara, 2014)

2.2 Verkehrskonflikttechnik

Aus den oben angeführten Überlegungen hat sich die Verkehrskonflikttechnik entwickelt, die den Konflikt als messbare Größe heranzieht. Die Methode geht auf Perkins und Harris (1968) zurück, die sich verstärkt mit der Verkehrssicherheit und dem Konfliktbegriff auseinandergesetzt haben. Sie definierten evasive Fahrmanöver als vorrangiges Indiz für Verkehrskonflikte. Diese umfassen alle Maßnahmen, wie beispielsweise Ausweichen, Stehenbleiben, hohe Beschleunigung und Verzögerung, die zur Vermeidung kritischer Verkehrssituationen beitragen.

Mit der Durchführung weiterer Studien hat sich gezeigt, dass evasive Maßnahmen nicht als einziges Kriterium für Konflikte herangezogen werden können. Einerseits sind nicht alle evasiven Fahrmanöver als solche zu interpretieren, sondern sind vielmehr einem vorrauschauendem Fahrverhalten zuzuordnen. Andererseits können auch kritische Verkehrssituationen auftreten, bei denen Fahrer keine evasiven Maßnahmen gesetzt haben. (Chin und Quek, 1997) Im Rahmen des First Workshop on Traffic Conflicts 1977 in Oslo wurde eine weitreichendere Definition des Konfliktes getroffen. Danach ist ein Konflikt eine beobachtbare Situation, in der zwei oder mehr Fahrer sich zeitlich und räumlich soweit annähern, dass ohne Bewegungsänderung der Beteiligten, die Gefahr einer Kollision gegeben ist (Hydén, 1996). Konflikte bedeuten nach dieser Definition ein potentielles Kollisionsereignis, das deutlich höhere Häufigkeiten aufweist als Unfälle selbst, wie Hydén anhand einer Konfliktpyramide in Abbildung 3 darlegt. Aus diesen Proportionen wird ersichtlich, in welchen Verhältnis sich gefahrlose Situationen, Konflikte und Kollisionen gegenüberstehen.

In manchen Fällen wird neben Verkehrskonflikten auch von Beinahe-Unfällen gesprochen. Laut RVS 02.02.22 (FSV, 1995) handelt es sich dabei um Situationen, bei denen keiner der Verkehrsteilnehmer eine Reaktion setzte, aber geringfügige Änderungen der Bewegungsart zur Kollision geführt hätten. Hoffmann (2013) sieht diese Beinahe-Unfälle als Konflikte mit einem höheren Gefahrenpotenzial, die im Gegensatz von Konflikten auch im Alleingang ohne zweiten Verkehrsteilnehmer stattfinden

können. In dieser Arbeit wird nicht explizit zwischen diesen beiden Fällen unterschieden, sondern immer von Konflikten ausgegangen.

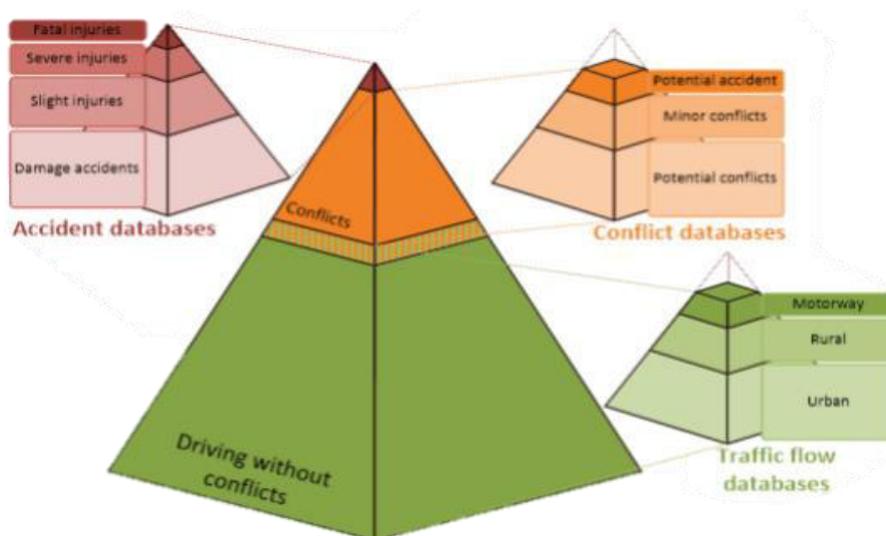


Abbildung 3: Konfliktpyramide nach Hydén (Haberl et al., 2018)

Um die Grenzen zwischen den unterschiedlichen Ebenen der Pyramide zu definieren, müssen Konflikte als messbare Ereignisse definiert werden. Zur Anwendung hierfür kommen die in Unterabschnitt 3.2.1 beschriebenen Ersatzgrößen, die unterschiedliche Bewegungszustände während des Konfliktereignisses beschreiben. Über sie können nicht nur Grenzwerte zur Unterscheidung zwischen Konflikten, Kollisionen und normalem Verkehrsablauf definiert werden, sondern auch Aussagen über den Schweregrad des Ereignisses getroffen werden. Hierfür ist es entscheidend zwischen dem Schweregrad von Konflikten und dem von Kollisionen zu unterscheiden. Nach Gettman und Head (2003) gibt die Konfliktschwere Auskunft über die Höhe der Wahrscheinlichkeit eines Kollisionsereignisses, während die Kollisionsschwere ausdrückt, wie gravierend die Auswirkungen einer Kollision wären. Eine sehr allgemein gehaltene Differenzierung wird von Lohse und Schnabel (2011) vorgeschlagen. Weitere Ansätze zur Konfliktschwere werden in Unterabschnitt 3.2.1 diskutiert.

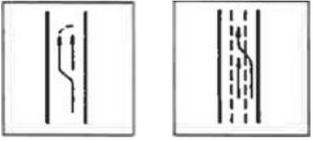
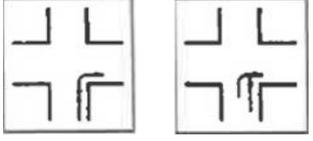
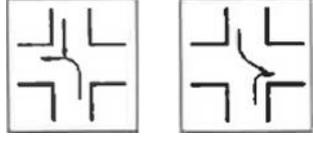
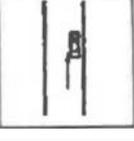
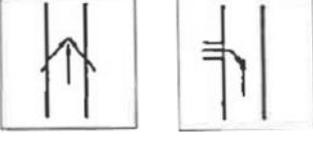
Tabelle 1: Konfliktschweregrade (Lohse und Schnabel, 2011)

Schweregrad	Definition
0	Folgenlose Rechtspflichtverletzung, d. h. bewusstes oder unbewusstes Missachten von verkehrsrechtlichen Bestimmungen ohne Folgekonflikte
1	Kontrolliertes Bremsen oder Beschleunigen und/oder Ausweichen, um eine Kollision zu vermeiden. Zeit für kritisches Fahrmanöver ist vorhanden. Das Fahrmanöver wird angezeigt.
2	Starkes Bremsen oder Beschleunigen und/oder Ausweichen, um eine Kollision zu verhindern. Das Fahrmanöver wird nicht angezeigt. Es folgt eine Notreaktion (Beinaheunfall)
3	Kollision (Unfall)

Die Verkehrskonflikttechnik umfasst Methoden zur systematischen Erhebung und Auswertung von Konflikten. Generell sind für die Erfassung von Konflikten die Typen, die Beteiligten, die Konfliktschwere, die räumliche und zeitliche Abgrenzung entscheidend. (Lohse und Schnabel, 2011)

Historisch bedingt, war die Beobachtung zur Detektion der Konflikte lange Zeit ein beliebtes Erhebungsinstrument. Diese ist in der RVS 02.02.22 unter dem Titel Verkehrskonfliktuntersuchung (FSV, 1995) als zur RVS 02.02.21 (FSV, 2014) ergänzende Methode verankert. Sie umfasst neben theoretischen Hintergründen auch Richtlinien zur korrekten Erfassung von Konflikten. Dazu zählen Hinweise bezüglich notwendiger Elemente zur Beschreibung des Beobachtungsfeldes und der -situation, Merkmale von Konflikten und Auswertungsverfahren. Zusätzlich werden die einzelnen Konflikttypen gemäß den in RVS 02.02.21 (FSV, 2014) verankerten Unfalltypen beschrieben. Diese sind Tabelle 2 zu entnehmen

Tabelle 2: Konflikttypen (FSV, 1995)

Obergruppe	Beschreibung	Konfliktdiagramm
0	Konflikte mit nur einem Beteiligten	
1	Konflikte im Richtungsverkehr	
2	Konflikte im Begegnungsverkehr	
3	Konflikte beim Abbiegen – richtungsgleich	
4	Konflikte beim Abbiegen – entgegengesetzte Richtung	
5	Rechtwinkelige Konflikte auf Kreuzungen beim Queren	
6	Rechtwinkelige Konflikte auf Kreuzungen beim Einbiegen	
7	Konflikte mit haltenden oder parkenden Fahrzeugen	
8	Konflikte mit Fußgängern	
9	Konflikte auf Parkplatz-, Tankstellen-, Haus-, oder Grundstücksaus- oder -einfahrten	

Für die hier vorliegende Arbeit sind nur die Konflikttypen 1 bis 6 relevant, da Konflikte mit nur einem Beteiligten, Fußgängerkonflikte oder Konflikte auf privatem Gelände, wie beispielsweise auf Parkplätzen oder Haus- und Grundstückseinfahrten unberücksichtigt bleiben. Begründet kann dies unter anderem damit werden, dass in der Verkehrskonflikttechnik und in der Verkehrsmodellierung die Interaktion zwischen sich bewegenden Fahrzeugen im Vordergrund steht.

Die Beobachtung im Feld ist als alleinige Erhebungsmethode insofern begrenzt, da sie nicht nur einen hohen personellen und zeitlichen Aufwand erfordert, sondern auch durch Subjektivität geprägt sein kann (McNamara, 2014). Aufgrund dieser Einschränkungen ist im Laufe der Zeit das Repertoire der Erhebungs- und Auswertungsinstrumente durch computergestützte Methoden erweitert worden. So liefern Fahrsimulatoren, maschinelles Lernen, GPS oder eine mittlerweile sehr hoch entwickelte Videotechnologie neue Möglichkeiten der Datengenerierung und -auswertung (Young et al., 2014). Zu diesen Methoden zählt auch die modellgestützte Auswertung in SSAM (Surrogate Safety Assessment Model), auf die in den nächsten Abschnitten eingegangen wird.

3 Verkehrskonfliktanalyse im mikroskopischen Verkehrsmodell

Ein grundlegendes Werkzeug für die Verkehrskonflikttechnik im Sinne einer proaktiven Herangehensweise stellen Verkehrssimulationsmodelle dar. Sie ermöglichen das komplexe Verkehrsgeschehen mit seinen technischen und sozialen Rahmenbedingungen in vereinfachter Weise vor Implementierung der Verkehrsanlage abzubilden. In den nächsten Abschnitten werden die Grundlagen zu den hier zur Anwendung kommenden Modellen dargelegt.

3.1 Mikroskopische Verkehrsflussmodelle

Grundsätzlich können Verkehrsmodelle je nach Untersuchungsschwerpunkt hinsichtlich ihrer Granularität unterschieden werden. Neben mikroskopischen Verkehrsflussmodellen haben sich noch drei weitere Stufen etabliert, die hier nach Detering (2011) und Langenberg (2015) zusammengefasst sind:

- **Makroskopische Modelle:** Diese Modellierungsebene verzichtet auf die Betrachtung von Einzelfahrzeugen und dient zur Ermittlung von Verkehrsstärken oder auch aggregierten Verkehrskenngrößen wie mittlere Geschwindigkeit oder Verkehrsdichte. Den theoretischen Rahmen bilden unter anderem Erkenntnisse aus der Fluidmechanik, aus der die Kontinuitätsgleichung übernommen wird.
- **Mesoskopische Modelle:** Einen höheren Detaillierungsgrad weisen mesoskopische Modelle auf. In dieser Form werden Einzelfahrzeuge beschrieben, die in Beziehung mit makroskopischen Verkehrskenngrößen wie Geschwindigkeits-Dichte-Relationen gesetzt werden. Unberücksichtigt bleiben dabei allerdings die Wechselwirkungen zwischen Fahrer und dem Umgebungsverkehr.
- **Nanoskopische Modelle:** Bei dieser Form der Modellierung werden neben der Betrachtung der Fahrzeug-Fahrer-Interaktion auf einem hohen Detaillierungsniveau auch fahrzeugdynamische Aspekte berücksichtigt.

Mikroskopische Verkehrsflussmodelle sind bezüglich ihrer Granularität vor der nanoskopischen Unfallmodellierung einzustufen. Im Fokus steht dabei die Betrachtung der Fahrzeuge in ihrem Umgebungsverkehr, während die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion und eine exakte Fahrdynamik sekundär sind. Aus diesem Grund kommen in mikroskopischen Modellen sogenannte Fahrer-Fahrzeug-Einheiten (FFE) zum Einsatz, die mit den umgebenen FFE entsprechend interagieren. (Detering, 2011) Wesentlich dafür ist die Längs- und Querdynamik der Einheiten, die mit drei unterschiedlichen Modellen beschrieben wird. Das Fahrzeugfolgeverhalten legt das Abstandsverhalten der Fahrer bei Kolonnenfahrt und im Speziellen die Interaktion zweier aufeinander folgender Fahrzeuge fest. Das Fahrstreifenwechselmodell legt die Regeln fest, nach denen die Fahrzeuge einen Fahrstreifenwechsel durchführen. Letztendlich wird über das Routenwahlmodell der Fahrtverlauf eines Fahrzeuges durch das Streckennetz bestimmt. Eine Route ist dabei definiert über eine Folge von Strecken und Verbindungen, zwischen einem Ausgangs- und einem Zielquerschnitt, die einem Fahrzeug während der Simulation zugewiesen wird. (FGSV, 2006) Insbesondere für die Folge- und Querverhaltensmodelle werden dabei basierend auf kinematischen Zusammenhängen relevante Größen, wie beispielsweise Relativgeschwindigkeiten und Abstände, zur Beschreibung der FFE-Beziehungen herangezogen (Detering, 2011).

In dieser Studie kommen vorrangig mikroskopische Ansätze unter Anwendung der Verkehrsflusssimulationssoftware PTV VISSIM zum Einsatz, allerdings liefern auch Erkenntnisse aus der nanoskopischen Simulation einen ergänzenden Beitrag. Dafür kommt die Unfallsimulationssoftware PC-Crash zum Einsatz, die es unter anderem ermöglicht, Berechnungen zu kinematischen Vorgängen oder Stoßmodellen

durchzuführen, Mehrkörpersysteme zu modellieren und auch Fahrerassistenzsysteme zu berücksichtigen (DSD, 2013). Dem vorrangig zur Analyse verkehrlicher Daten konzipierten VISSIM fehlen weitgehend Möglichkeiten, um solche Aspekte effizient berücksichtigen zu können und Auskunft über realistische, detaillierte Bewegungstrajektorien zu geben, die für die Konfliktdetektion essentiell sind. Andererseits bietet es die Möglichkeit der Konfliktdetektion im Verkehrsflussmodell, das in der nanoskopischen Modellierung nur bedingt möglich ist. Aus diesem Grund fand im Zuge dieser Studie immer wieder eine Rückkopplung zwischen den beiden Systemen statt. Dieser Vorgang wird in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** noch detailliert erläutert und zusätzliche Ausführungen dazu sind Haberl et al. (2018) zu entnehmen.

In Folge werden nun die Grundlagen zur Beschreibung der Längs- und Querdynamik, die in mikroskopischen Ansätzen Bedeutung finden, vorgestellt.

3.1.1 Fahrzeugfolgeverhalten

Das psychologisch-physische Fahrzeugmodell von Wiedemann (1974) ist eines der wesentlichen Modelle zur Beschreibung des Folgeverhaltens. Es beschreibt den Folgevorgang zwischen zwei Fahrzeugen und berücksichtigt dabei den Zusammenhang des physischen Reizes mit der psychologischen Reaktion der fahrenden Person. Bevor auf den in Abbildung 4 dargestellten Vorgang eingegangen wird, erfolgt noch eine kurze Erläuterung der einzelnen Begrifflichkeiten und Grenzwerte.

AX steht für den Stillstandsabstand des Folgefahrzeuges, wobei dieser als Bruttoabstand definiert ist und sich somit aus der Fahrzeuglänge des vorrausfahrenden Fahrzeuges und dem Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen zusammensetzt. Wird dieser Grenzwert unterschritten, kollidieren die beiden Fahrzeuge.

BX repräsentiert den gewünschten minimalen Bruttofolgeabstand des zweiten Fahrzeuges bei etwa gleicher Geschwindigkeit. Dieser setzt sich zusammen aus einem konstanten Teil, dem Stillstandsabstand AX, und einem geschwindigkeitsabhängigen Abstand. Da bei höheren Geschwindigkeiten der Folgeabstand nicht proportional ansteigt, sondern ein risikofreudigeres Fahrverhalten zu geringeren Sicherheitsabständen führt, fließt ein parabolischer Zusammenhang zwischen BX und der Geschwindigkeit in diesen Grenzwert mit ein.

SDX gibt den oberen Grenzwert für das Abdriften während des Folgevorganges an. Sie schwankt bei dem 1,5-2,5-fachen des Mindestabstandes.

In Abbildung 4 befinden sich rechts die Grenzwerte für den Annäherungsvorgang. Dabei ist **SDV** die Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeitsdifferenzen bei relativ großen Abständen im Annäherungsprozess, während **CLDV** die Wahrnehmungsschwelle bei geringen Geschwindigkeitsdifferenzen darstellt. Analog dazu repräsentiert **OPDV** die Wahrnehmungsschwelle bei geringen Geschwindigkeitsdifferenzen während der Entfernungsvorganges.

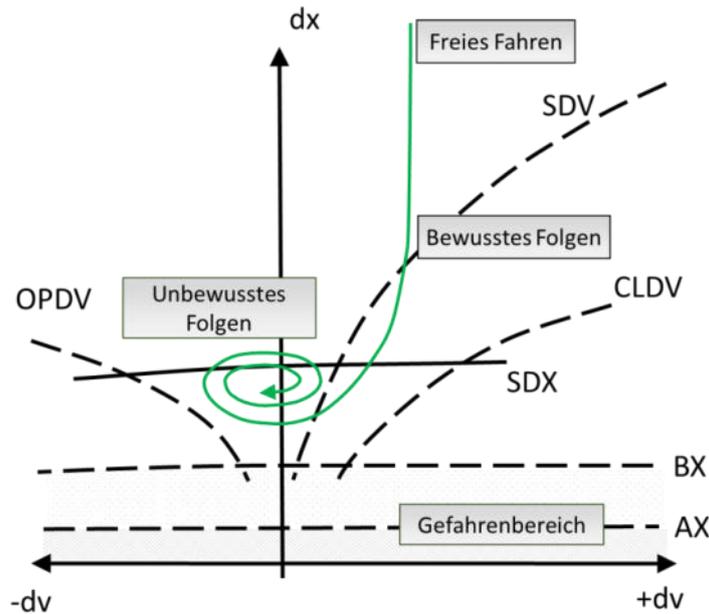


Abbildung 4: Folgemodell Wiedemann (1974) [eigene Darstellung]

Anhand der definierten Schwellenwerte kann nun der Folgevorgang entlang der in grün gehaltenen Linie in Abbildung 4 beschrieben werden. Das Folgefahrzeug nähert sich mit einer Geschwindigkeit dem vorausfahrenden Fahrzeug, das mit einer geringeren Geschwindigkeit fährt. Sofern das Folgefahrzeug sich noch im Bereich des freien Fahrens befindet, treten hier keine weiteren Veränderungen auf. Sobald jedoch das Folgefahrzeug das Vorderfahrzeug einholt, überschreitet es SDV und nimmt folglich das Vorderfahrzeug wahr. Um eine Kollision zu verhindern, ist das Folgefahrzeug gezwungen abzubremsen um die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den beiden Fahrzeugen zu verringern. Dadurch fällt das Fahrzeug in den Bereich des unbewussten Folgen. Die fahrende Person ist nicht in der Lage, sich der Geschwindigkeit des Vorderfahrzeuges genau anzupassen, sondern fährt minimal schneller bzw. langsamer. Dadurch ändert sich die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den beiden Fahrzeugen und führt letztendlich zu der charakteristischen Spirale des Folgevorganges, bei dem das Folgefahrzeug zwischen SDX und BX oszilliert. Wird eine der Grenzen überschritten, fällt das Fahrzeug entweder wieder zurück in den Zustand des unbeeinflussten Folgen oder tritt in die Gefahrenzone ein. Fällt das Fahrzeug in den negativen Geschwindigkeitsdifferenzbereich, wird OPDV unterschritten und das Folgefahrzeug fällt wieder aus dem Einflussbereich des Vorderfahrzeuges.

In VISSIM wird das Wiedemann Folgeverhalten anhand zwei unterschiedlicher Implementierungen umgesetzt. Das Wiedemann 74 Modell beinhaltet nur drei Parameter, die sich auf den Folgeabstand konzentrieren, während hingegen mit den zehn Parametern des Wiedemann 99 Modells noch zusätzlich Aspekte wie beispielsweise das Verzögerungsverhalten berücksichtigt werden. Das Anwendungsgebiet dieser beiden Modelle bietet nach wie vor Anlass zur Diskussion in Forschung und Praxis. Während Manjunatha et al. (2013) Unterschiede lediglich in der Stochastizität des Fahrermodells und in den Parametrierungsmöglichkeiten sieht, gibt PTV (2016) klare Empfehlungen bezüglich Anwendungsgebiete dieser Modelle, in denen das Wiedemann 74 Modell für den innerstädtischen Verkehr sowie für Verflechtungsbereiche und das Wiedemann 99 Modell für den Autobahnverkehr vorgesehen ist.

3.1.2 Fahrstreifenwechselverhalten

Neben dem Folgeverhalten ist auch das Fahrstreifenwechselverhalten oder laterale Verhalten elementar für mikroskopische Modelle, insbesondere im Zusammenhang mit sicherheitsspezifischen Analysen. Dabei werden zwei Formen unterschieden, nämlich notwendige und freiwillige bzw. freie Fahrstreifenwechsel. Der erste Fall tritt ein, wenn es Fahrzeugen aufgrund der Routenführung, Verkehrsregelungen oder Fahrstreifenreduktion nur über einen spezifischen Fahrstreifen gewährt wird, ihr Ziel zu erreichen. Ein freier Fahrstreifenwechsel hingegen ermöglicht den Fahrzeugen, ihre Wunschgeschwindigkeit zu realisieren (Hoffmann, 2013). In den bekanntesten Simulationswerkzeugen kommen die Modelle von Sparmann (1978) und Gipps (1986) zum Einsatz, die in Folge kurz erläutert werden (Detering, 2011).

Das Modell nach Sparmann beschreibt aufbauend auf den Überlegungen aus dem Wiedemann Folgemodell den freien Fahrstreifenwechsel unter Berücksichtigung des Rechtsfahrgebots. Unterschieden wird hierbei zwischen Fahrspur (rechter Fahrstreifen) und Überholspur (linker Fahrstreifen). Um seine Wunschgeschwindigkeit weitgehend zu realisieren versucht das Fahrzeug bei wahrgenommener zukünftiger Behinderung durch ein vorausfahrendes, langsames Fahrzeug möglichst früh auf die Überholspur zu wechseln. Dabei wird überprüft, ob der Nachbarfahrstreifen einen Wechsel zulässt bzw. durch den Wechsel keine sicherheitskritische Situation hervorgerufen wird. Sofern kein Fahrstreifenwechsel aufgrund dieser Bedingungen möglich ist, wird das Fahrzeug gezwungen, seine Geschwindigkeit an das vorausfahrende Fahrzeug anzupassen. Ist hingegen der Fahrstreifenwechsel erfolgreich vollzogen, so versucht das Fahrzeug aufgrund des Rechtsfahrgebots nach dem Überholen wieder auf die Fahrspur zu gelangen. Wenn dem Fahrzeug für ein Zeitintervall das Fahren mit Wunschgeschwindigkeit ermöglicht wird und der Einflussbereich des langsameren Fahrzeuges nicht mehr berührt wird, so wird der Fahrstreifenwechsel zurück auf die Fahrspur vollzogen. (Detering, 2011)

Das Modell von Gipps berücksichtigt bei der Wahl des Fahrstreifens, dass der Fahrer den für die Weiterfahrt im Straßenverkehrsnetz notwendigen Zielfahrstreifen einnimmt sodass er möglichst mit seiner Wunschgeschwindigkeit fahren kann. Die Entscheidungsbasis für einen Fahrstreifenwechsel liefern die in Abbildung 5 ersichtlichen drei Zonen, welche die unterschiedlichen Fahrstreifenwechsellvorgänge beschreiben. In der ersten Zone befindet sich das Fahrzeug noch weitgehend im Zustand des freien Fahrstreifenwechsels. Auf den linken Fahrstreifen wird dieser vollzogen, wenn einem Fahrzeug dabei ermöglicht wird mit einer höheren Geschwindigkeit zu fahren. Im Gegenzug dazu fährt das Fahrzeug wieder zurück auf den rechten Fahrstreifen, wenn es seine Geschwindigkeit nicht maßgeblich reduzieren muss. In der Zone 2 wird neben der Wunschgeschwindigkeit auch die Routenentscheidung relevant, da in diesem Abschnitt das Fahrzeug versucht den Zielfahrstreifen oder zumindest einen Nachbarfahrstreifen zu erreichen. Letztendlich ist in Zone 3 nur noch die Routenentscheidung maßgeblich, während die Wunschgeschwindigkeit ignoriert wird. Folglich nimmt hier der Fahrer auch geringere Geschwindigkeiten in Kauf, um auf seinem Wunschfahrstreifen zu bleiben bzw. dorthin zu wechseln. Die Bewertung der Sicherheit im Zuge des Fahrstreifenwechsels erfolgt in Abhängigkeit der Zonen bzw. der Dringlichkeit eines Fahrstreifenwechsels. (Detering, 2011)

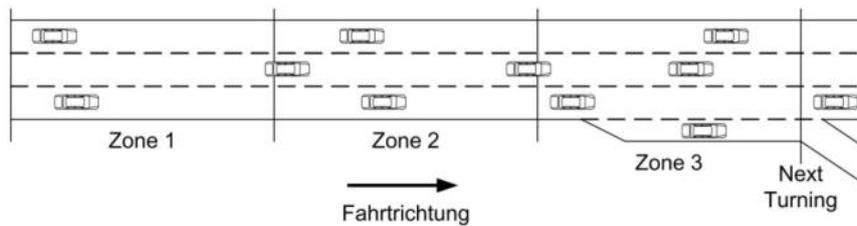


Abbildung 5: Zonen des Fahrstreifenwechsel nach Gipps (Detering, 2011)

In VISSIM wird ebenfalls in einen freien und notwendigen Fahrstreifenwechsel unterschieden. Solange das Fahrzeug unbeeinflusst vom weiteren Routenverlauf ist, wird überprüft, ob ein Wechselwunsch vorliegt. Dies tritt dann ein, wenn sich das Fahrzeug nicht im freien Fahrzustand nach dem Wiedemann Folgemodell befindet. Wenn am Nachbarfahrstreifen bessere Fahrbedingungen vorzufinden sind, wird die Möglichkeit eines Fahrstreifenwechsels überprüft und dieser letztendlich vollzogen. Für den notwendigen Fahrstreifenwechsel, der das Einhalten des Routenverlaufes gewährleistet, werden zwei zusätzliche Distanzen berücksichtigt. Die Fahrstreifenwechseldistanz definiert den Punkt, an dem der Fahrer sich der nächsten Abbiegesituation bewusst wird und diese in der Fahrstreifenwahl berücksichtigt. Die Nothaltedistanz beschreibt die Position, an der das Fahrzeug für den Fahrstreifenwechsel hält für den Fall, dass es bis dahin seinen Zielfahrstreifen noch nicht erreicht hat. Sowohl im freien als auch im notwendigen Fahrstreifenwechsel können die Folgefahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen zu einer Reduktion der Geschwindigkeit gezwungen werden. Im Falle eines notwendigen Fahrstreifenwechsel kann eine Geschwindigkeitsverminderung auch bei den wechselnden Fahrzeugen auftreten. (Fellendorf und Vortisch, 2010)

3.2 Surrogate Safety Assessment Model – SSAM

Das Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) ist eine Software zur modellbasierten Untersuchung von Konflikten. Dieses von der Federal Highway Administration entwickelte Werkzeug ermöglicht eine Untersuchung des Konfliktpotenzials an Straßenverkehrsanlagen bereits in der Modellierungsphase. Anhand der in der Verkehrsflusssimulation generierten Fahrzeugtrajektorien detektiert SSAM nicht nur die Konflikte, sondern berechnet für jeden Konflikt dessen Kenngrößen und Attribute der beteiligten Fahrzeuge. In Folge werden nun die wichtigsten Begrifflichkeiten und Kenngrößen sowie der Berechnungsalgorithmus zur Ermittlung von Konflikten dargelegt.

3.2.1 Ersatzgrößen

Für die Analyse der Konflikte werden in SSAM sogenannte Ersatzgrößen oder Konfliktkenngrößen eruiert. Diese beschreiben einerseits den Konflikt als gesamtes Ereignis, als auch die Bewegungszustände der beteiligten Fahrzeuge. Die Aufgabe dieser Konfliktgrößen ist es, Auskunft über den Konflikt und das potentielle Kollisionsereignis zu geben. Essentiell ist dabei auch der Schweregrad der beiden Ereignisse, der anhand der Konfliktkenngrößen annähernd bestimmt werden kann. Ein Überblick über die wichtigsten Kenngrößen (in blau) ist in Abbildung 6 ersichtlich.

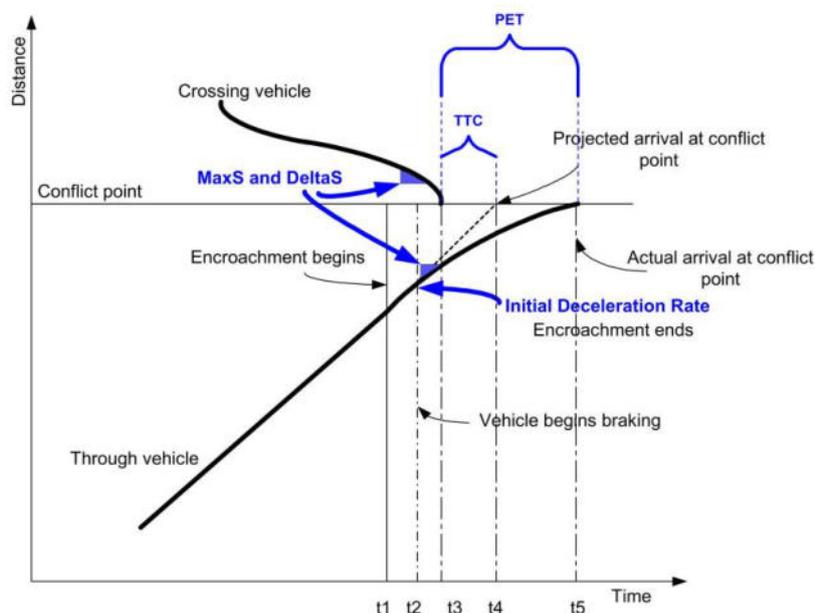


Abbildung 6: Konfliktkenngrößen (Gettman und Head, 2003)

TTC - Time To Collision

TTC ist einer der wesentlichen Konfliktparameter, da anhand dieser Größe entschieden wird, ob ein Konflikt vorliegt oder nicht. Nach der in Abschnitt 2.2 behandelten Konfliktdefinition von Hydén beschreibt sie den Zeitraum, den zwei sich auf Kollisionskurs befindliche Fahrzeuge ohne Bewegungsänderung vom momentanen Zeitpunkt bis zur Kollision benötigen würden. Ermittelt wird TTC aus dem geometrischen Abstand der beiden Fahrzeuge dividiert durch die Geschwindigkeitsdifferenz zum aktuellen Zeitpunkt t .

$$TTC_{(t)} = \frac{\Delta s_{(t)}}{\Delta v_{(t)}}$$

Δs Geometrische Distanz der Fahrzeuge

Δv Geschwindigkeitsdifferenz der Fahrzeuge

TTC ist eine wesentliche Kenngröße zur Detektion von Konflikten, denn nur, wenn eine bestimmte TTC erreicht wird, kann von Konflikten gesprochen werden. Etabliert hat sich hierbei ein oberer Grenzwert von 1,5 Sekunden, da bei größeren Zeitlückenabstände nicht mehr von einer drohenden Kollision ausgegangen werden kann. Hingegen bedeutet eine TTC von Null, dass es sich nicht mehr um einen Konflikt, sondern bereits um eine Kollision handelt. Je geringer TTC ist, desto größer ist die Konfliktschwere und desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einer Kollision kommt. Gettman et al. (2008) schlagen für leichte Konflikte einen Wertebereich von 1-1,5 Sekunden, für mittlere einen Bereich von 0,5 -1 Sekunden und für schwere 0-0,5 Sekunden vor.

In SSAM wird der Zeitpunkt, zu dem die minimale TTC eruiert wird, mit **tMinTTC** bezeichnet. In dieser Arbeit wird sie auch mit dem Konfliktzeitpunkt gleichgesetzt.

PET - Post-Encroachment-Time

PET ist das Zeitintervall, nachdem das erste Fahrzeug den Konfliktpunkt- oder -fläche verlassen hat und das zweite Fahrzeug über diesen Bereich fährt. Der Vorteil dieser Kenngröße ist, dass hier keine Kollisionsereignisse als Voraussetzung dienen und sie somit umfassender eingesetzt werden kann (Archer, 2005). PET ist ebenfalls ein Indikator für die Konfliktschwere und gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der es zu einer Kollision kommen kann. Gleich wie bei TTC bedeutet eine PET von Null, dass eine Kollision vorliegt, während der empfohlene Grenzwert in SSAM mit 5 Sekunden angesetzt ist. (Gettman et al., 2008)

In SSAM werden die Koordinaten des Konfliktpunktes mit **xMinPET / yMinPET** bezeichnet. Hierbei handelt es sich um die Position des Konfliktpunktes zum Zeitpunkt, an dem die minimale PET eruiert wird. Herangezogen wird dabei der Mittelpunkt des ersten Fahrzeuges zu dem Zeitpunkt, an dem das nachfolgende zweite Fahrzeug die kürzeste zeitliche Entfernung aufweist.

DR - Initial Deceleration Rate

Die Initial Deceleration Rate gibt an, wie stark ein Fahrzeug im Sinne eines evasiven Manövers verzögern muss und kennzeichnet den Beginn des Konfliktes. In SSAM wird dafür die erste negative Beschleunigung des zweiten Fahrzeuges herangezogen. Tritt während des Konfliktes keine Verzögerung auf, wird die niedrigste Beschleunigung während des Konfliktereignisses gewählt. Die Initial Deceleration Rate ist ebenfalls ein Indiz für die Konfliktschwere. Je stärker ein Fahrzeug verzögern muss, um eine Kollision zu vermeiden, desto größer ist der Schweregrad des Konfliktes. Eine mögliche Klassifizierung wird von Hupfer (1997) vorgeschlagen, der in seinen Studien mit Fußgängern die Deceleration to Safety Time verwendet, welche die notwendige Verzögerung zum Erreichen des zeitlichen Sicherheitsabstandes definiert. So deuten Verzögerungen bis zu 2 m/s^2 auf unkritische Verkehrssituationen hin, da keine oder nur in geringem Maße eine Abstimmung zwischen den Verkehrsteilnehmern erforderlich ist. Bis zu 6 m/s^2 ergeben sich Konfliktsituationen, die bereits eine Reaktion erfordern. Abhängig von der Verzögerung und der Möglichkeit, in das Verkehrsgeschehen einzugreifen ergeben sich dabei unterschiedliche Konfliktschwerestufen. Größere Verzögerungen erlauben keine kontrollierte Reaktion mehr und resultieren in einen Beinahe-Unfall bzw. in eine Kollision.

Tabelle 3: Konfliktschweregrade anhand der Deceleration Rate (Hupfer, 1997)

Initial Deceleration Rate	Beschreibung der erforderlichen Reaktion
DR = 0 m/s ²	keine Abstimmung erforderlich Der erreichte Sicherheits-Zeitabstand ist größer als x, eine Abstimmung ist nicht erforderlich
DR < 1 m/s ²	Abstimmung erforderlich (Interaktion) Die erforderliche Reaktion ist so gering, dass lediglich eine Abstimmung der Verhaltensweisen erfolgen muss
DR < 2 m/s ²	Reaktion erforderlich (Konflikt-Stufe 1) Die Situation erfordert eine merkliche Verzögerung eines Verkehrsteilnehmers. Die Situation ist leicht kontrollierbar. Sie gibt genügend Zeit zur Orientierung und Berücksichtigung weiterer Verkehrsvorgänge
DR < 4 m/s ²	deutliche Reaktion erforderlich (Konflikt-Stufe 2) Die Situation erfordert eine deutliche Verzögerung eines Verkehrsteilnehmers. Die Situation ist kontrollierbar. Andere Verkehrsvorgänge können kaum berücksichtigt werden.
DR < 6 m/s ²	Sehr deutliche Reaktion erforderlich (Konflikt-Stufe 3) Die Situation erfordert eine sehr deutliche Verzögerung eines Verkehrsteilnehmers, die kaum kontrollierbar ist. Andere Verkehrsvorgänge können nicht berücksichtigt werden.
DR = 6 m/s ²	Notbremsung (Konflikt-Stufe 4) Keine kontrollierte Reaktion. Beinahe-Unfall
Kollision	Keine Reaktion mehr möglich

MaxD - Maximum Deceleration

Dabei handelt es sich um die maximale Verzögerung des zweiten Fahrzeuges während des Konfliktereignisses. Auch hier gilt wieder, sofern keine Verzögerung auftritt, dass die niedrigste Beschleunigung herangezogen wird.

MaxS - Maximum Speed

Dieser Wert gibt die höchste Geschwindigkeit während des Konfliktereignisses an. Dabei spielt es keine Rolle, ob dieser Wert vom ersten oder zweiten Fahrzeug stammt.

ConflictType

Der Konflikttyp wird über den Winkel bestimmt, mit dem die beiden Fahrzeuge aufeinandertreffen und ist in SSAM über die **ConflictAngle/ ClockAngle** definiert. Angegeben wird er entweder in Grad mit einem Wertebereich von 0° und +/-180° oder im Uhrzeitformat mit Werten zwischen 0:00 und 12:00.

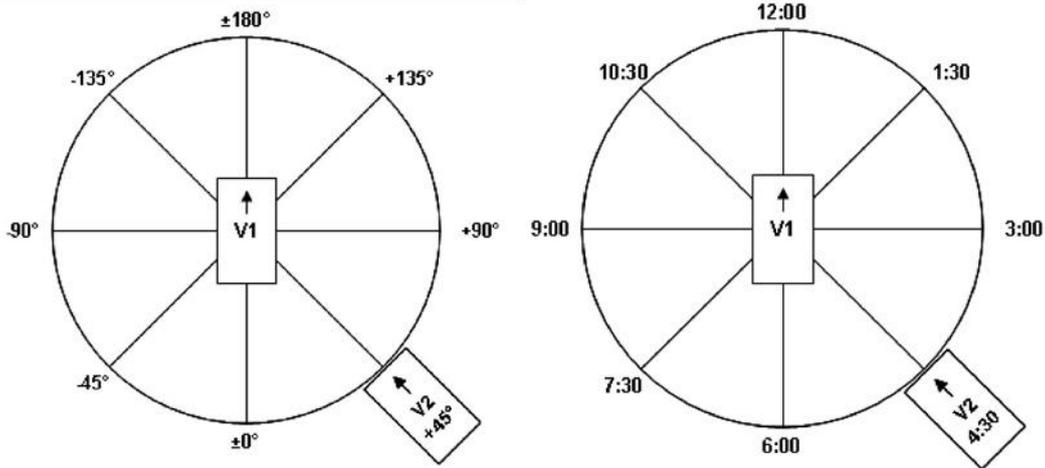


Abbildung 7: Konfliktwinkel in Grad und Uhrzeitformat (Gettman et al., 2008)

Der Konflikttyp lässt sich in drei Fälle unterscheiden. Tritt ein Winkel zwischen 85° und 180° auf, so handelt es sich um einen Rear-End-Konflikt (Heckkonflikt). Winkel zwischen 30° und 85° fallen in die Kategorie des Lane-Chance-Konflikts (Fahrstreifenwechselkonflikt). Und letztlich sind die Crossing-Konflikte (Kreuzungskonflikte) mit 85° bis 180° definiert. Es handelt sich hierbei allerdings um keine fixierten Grenzwerte, sondern um empfohlene Einstellungen in SSAM, die bei Bedarf auch für die Konfliktauswertung verändert werden können. In Abbildung 8 sind die Konfliktwinkel mit der jeweiligen Kategorie dargestellt.

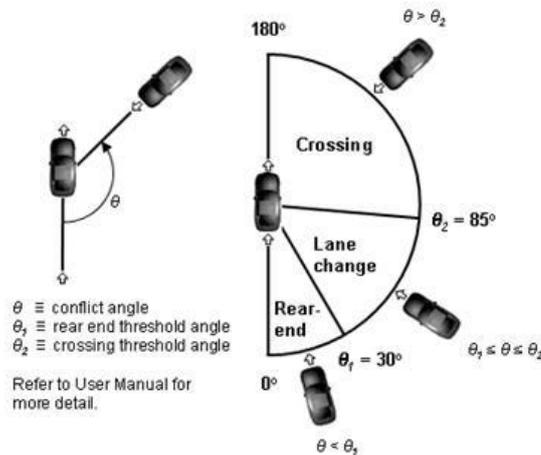


Abbildung 8: Konflikttyp in Abhängigkeit des Konfliktwinkels (Gettman et al., 2008)

Da der Konfliktwinkel sich auf die Geschwindigkeitsvektoren auswirkt, übt er auch Einfluss auf den Schweregrad der Kollision aus. Die Zusammenhänge zwischen den Geschwindigkeitsvektoren werden nun in Folge dargestellt.

DeltaS - Speed Difference

Dieser Wert gibt die Differenz der Geschwindigkeitsvektoren beider Fahrzeuge an. Er ist somit nicht nur vom Betrag der Geschwindigkeit abhängig, sondern auch die Richtung wird dabei berücksichtigt. Daraus folgt, dass zwei Fahrzeuge mit der gleichen Geschwindigkeit v in entgegengesetzte Richtung

ein DeltaS von 2v aufweisen würden. Umgekehrt führen Bewegungsvorgängen in gleicher Richtung zu einem DeltaS von 0.

Die Geschwindigkeitsvektoren der beiden Fahrzeuge ergeben sich in SSAM bezüglich dessen Beträge aus **First(Second)VMinTTC** und bezüglich deren Ausrichtung mit **First(Second)Heading**.

MaxDeltaV

Diese Kenngröße steht für das maximale DeltaV, das während des Konfliktereignisses bei einem der Fahrzeuge auftritt. Für die Berechnung von DeltaV wird von einer theoretischen Kollision ausgegangen und in Form eines plastischen Stoßes die Geschwindigkeit nach dem Stoß berechnet.

$$\bar{v} = \frac{m_1 * v_1 + m_2 * v_2}{m_1 + m_2}$$

$$\Delta v_{1,2} = \bar{v} - v_{1,2}$$

$v_{1,2}$	Geschwindigkeiten vor der Kollision
$m_{1,2}$	Masse der Fahrzeuge
\bar{v}	Geschwindigkeit nach der Kollision
$\Delta v_{1,2}$	DeltaV der Fahrzeuge

DeltaV ist eine wesentliche Konfliktkenngröße, die Auskunft über die Kollisionsschwere gibt. Beeinflusst durch Massen, Geschwindigkeiten und Bewegungswinkel steigt mit zunehmenden DeltaV die Kollisionsschwere. Die Geschwindigkeit nach dem Stoß wird in SSAM über die **PostCrashV** und **Post-CrashHeading** ausgegeben, wobei ersteres wiederum auf den Betrag und zweites auf die Ausrichtung zu beziehen ist.

An dieser Stelle werden anhand eines konkreten Beispiels aus dem in dieser Arbeit verwendeten Verkehrsflussmodells die einzelnen Konfliktgrößen mit den jeweiligen Simulationssituationen dargelegt. Der extrahierte Konflikt aus VISSIM ist in Abbildung 9 ersichtlich, wobei in blau das erste Fahrzeug und in grün das zweite Fahrzeug zu erkennen ist. Der in SSAM ermittelte Konfliktpunkt ist mit KP gekennzeichnet. Zur besseren Darstellung des Konfliktgeschehenes, sind ergänzend die Geschwindigkeits- und Beschleunigungstrajektorien dargestellt. Anhand dieser Verläufe ist ersichtlich, dass das erste Fahrzeug vor dem Konfliktpunkt seine Geschwindigkeit erhöht, um den Konfliktpunkt rechtzeitig vor Fahrzeug 2 zu passieren. Allerdings wird durch dieses Manöver das zweite Fahrzeug dazu gezwungen seine Geschwindigkeit mit einer Verzögerung von über 4 m/s² zu reduzieren, um eine Kollision zu vermeiden.

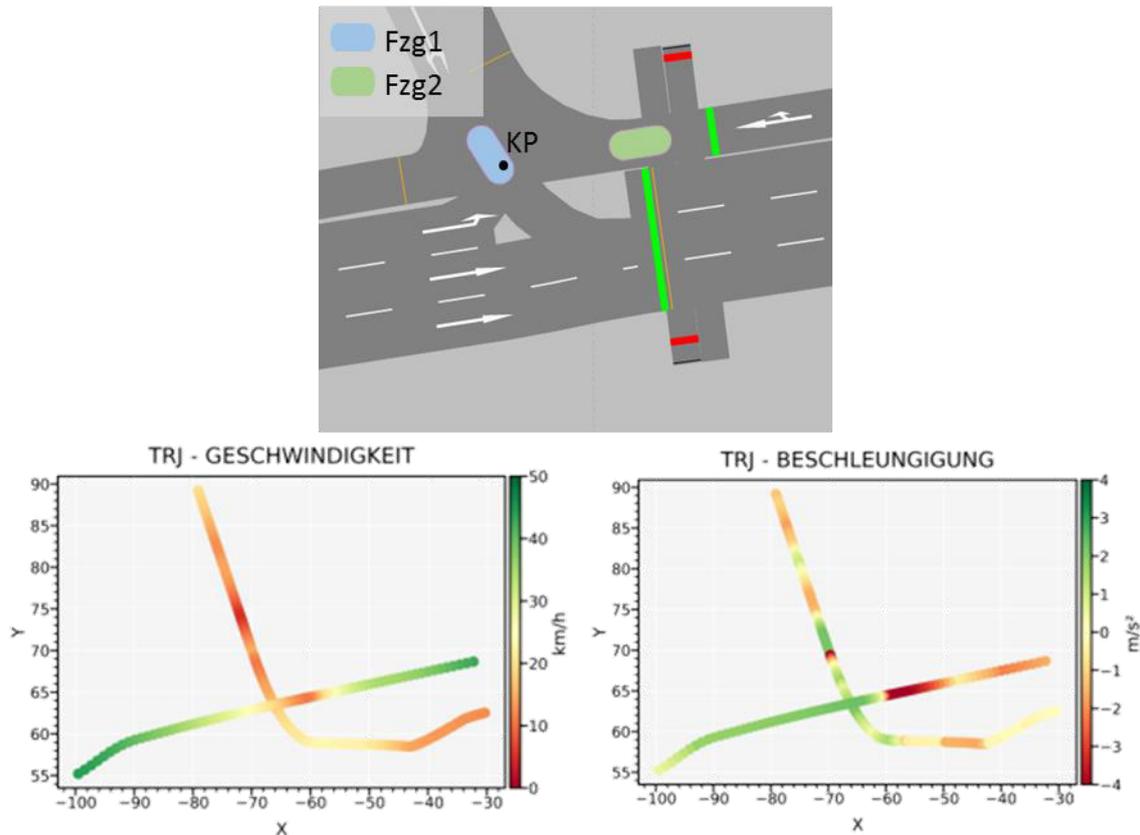


Abbildung 9: Konflikt mit Bewegungstrajektorien

In Abbildung 10 ist die grafische Ermittlung von TTC und PET für diesen speziellen Konflikt ersichtlich und die jeweilige Situation in VISSIM darunter dargestellt. Das erste Fahrzeug (blaue Linien) nähert sich dem Konfliktpunkt. Mit dem Beginn der Verzögerung, in SSAM mit DR gekennzeichnet, startet auch das Konfliktereignis. Wird die zu dem Zeitpunkt gefahrene Geschwindigkeit und Richtung beibehalten, so erreicht das zweite Fahrzeug den Konfliktpunkt in der Simulationssekunde 3259,3. Ausgehend von der Simulationssekunde, an der SSAM den Konflikt detektiert (t_{MinTTC}) und dem Schnittpunkt der projizierten Trajektorie wird TTC ermittelt. PET ergibt sich aus den Heckkoordinaten des ersten Fahrzeuges und den Frontkoordinaten des zweiten Fahrzeuges. Aus den jeweiligen Abbildungen aus der Simulation ist ersichtlich, dass die Fahrzeuge zum Zeitpunkt 1, also zum Beginn der Verzögerung sich dem Konfliktpunkt annähern. Zum Zeitpunkt 2, der t_{MinTTC} entspricht, befindet sich das erste Fahrzeug direkt auf dem Konfliktpunkt (KP), während das grüne Fahrzeug bereits verzögert. Das erste Fahrzeug verlässt den Konfliktpunkt zum Zeitpunkt 3, während das zweite diesen zum Zeitpunkt 4 erreicht.

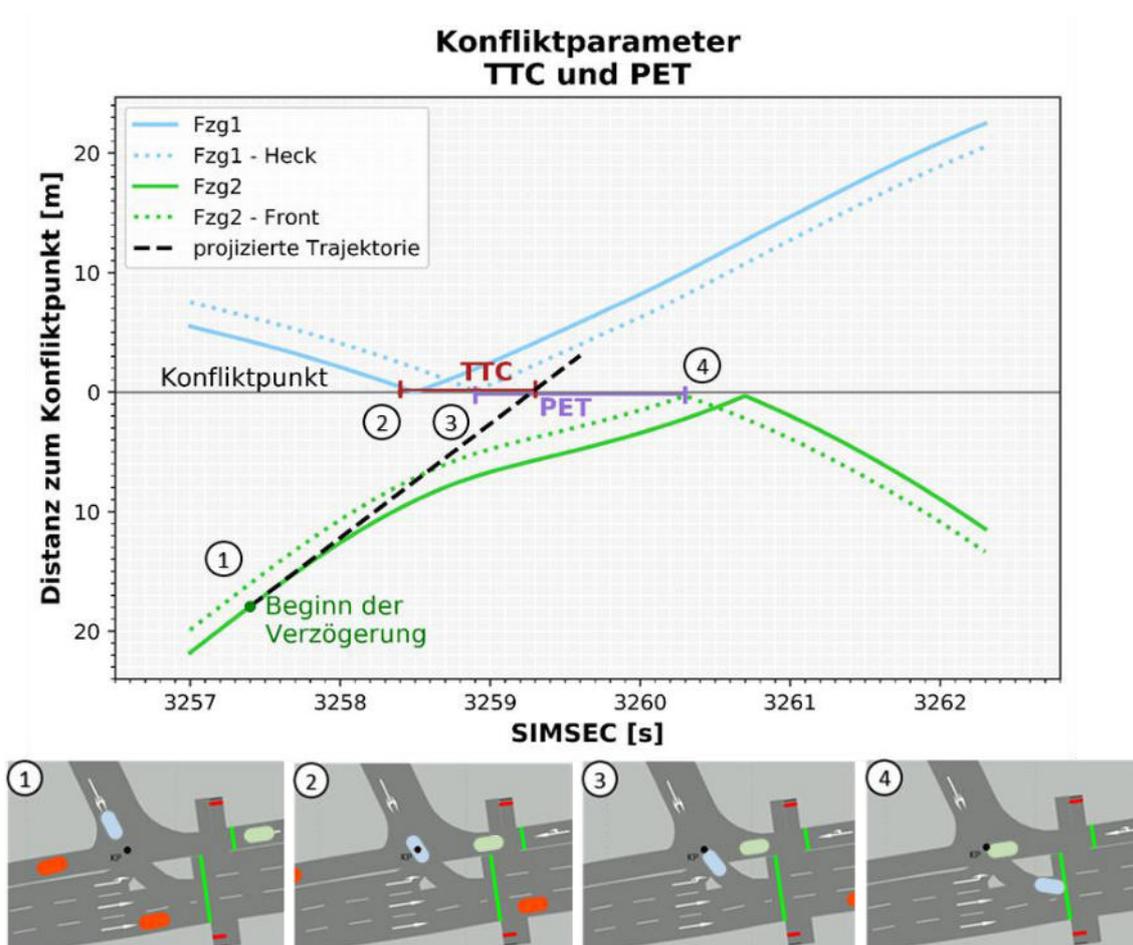


Abbildung 10: Konfliktparameter und Modellsituationen

In Abbildung 11 sind die Geschwindigkeitsvektoren des oben dargestellten Konfliktes ersichtlich, die sich anhand der Ergebnisse eruieren lassen. In SSAM wird zum Zeitpunkt t_{MinTTC} die Geschwindigkeit First(Second)VMinTTC der beiden Fahrzeuge ermittelt. Links oben sieht man den plastischen Stoß in Form von Vektoren mit der Resultierenden dargestellt. Die hierfür verwendeten Massen werden anhand der Fahrzeuggröße abgeschätzt. Rechts oben ist ΔS dargestellt. Aus den beiden oberen Abbildungen ist ersichtlich, dass ΔS mit zunehmenden Konfliktwinkel ansteigt, während Post-CrashV sich verringert. Im unteren Bereich ist ΔV der beiden Fahrzeuge dargestellt. Dabei wird für beide Fahrzeuge das ΔV berechnet und das höhere von SSAM gewählt, allerdings ergibt sich in diesem Konflikt zufällig ein gleiches ΔV . Die Größe von ΔV ist nicht nur durch Massen und Geschwindigkeiten bedingt, sondern auch durch den Konfliktwinkel beeinflusst.

Konfliktparameter Geschwindigkeitsvektoren

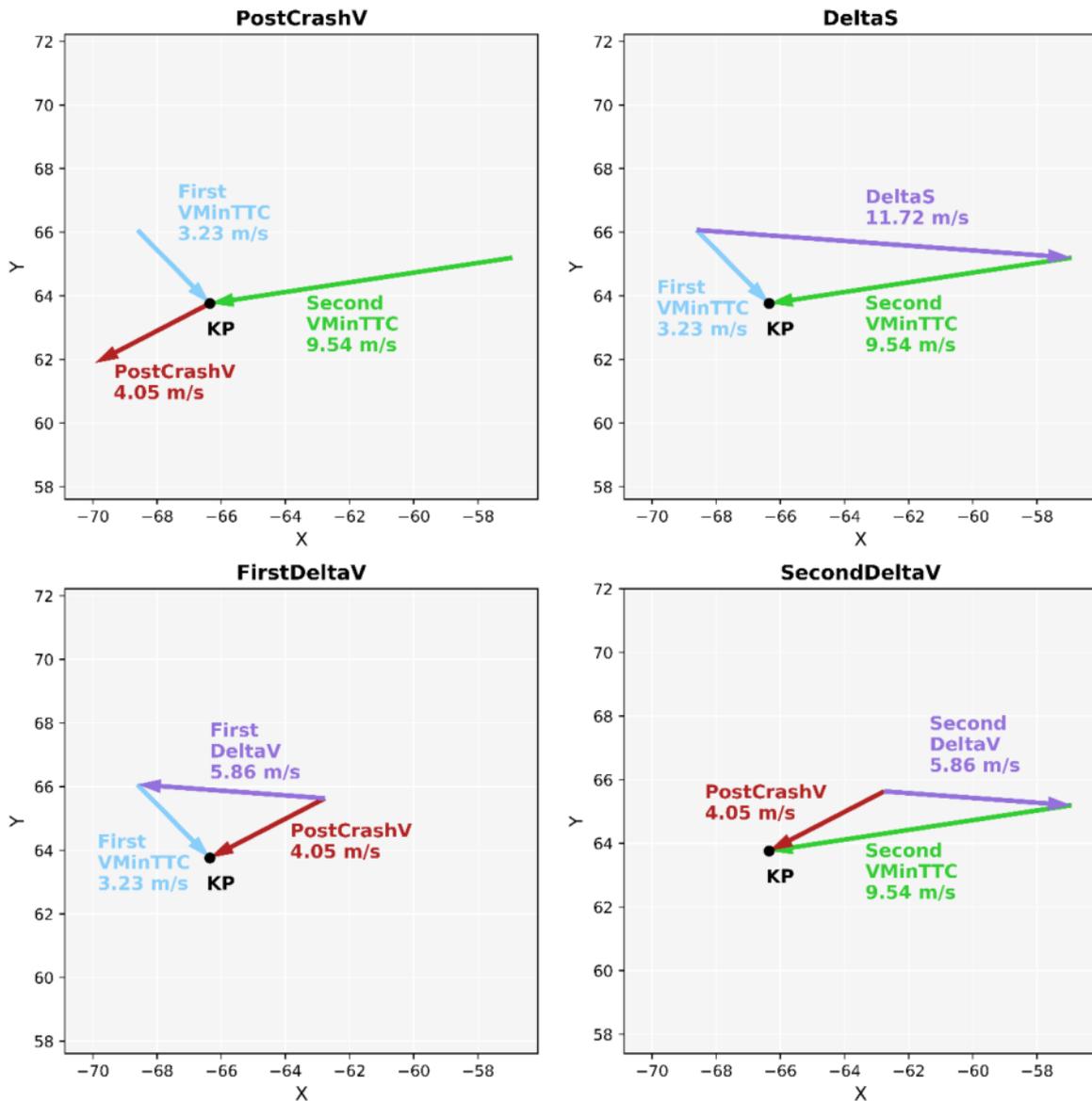


Abbildung 11: Geschwindigkeitsvektoren während des Konfliktereignisses aus Simulation

3.2.2 Algorithmus

Die aus VISSIM ermittelten Daten werden in Form von Trajectory Files (*.trj) an SSAM übergeben. Daraus ermittelt es die Fahrzeuginteraktionen und definiert anhand vorgegebener Grenzwerte, ob und in welcher Form ein Konflikt vorliegt. Nach der Übergabe der Trajektoriendateien startet SSAM den Berechnungsalgorithmus, der an dieser Stelle verkürzt dargelegt ist. Eine ausführliche Darstellung ist Gettman et al. (2008) zu entnehmen.

1. Zu Beginn wird das mikroskopischen Modellnetz mit einem 15,25*15,25 Meter Raster überlagert
2. Zu jedem Zeitschritt wird für jedes Fahrzeug eine erwartete Position als Funktion der aktuellen Geschwindigkeit projiziert, unter der Voraussetzung, dass es seinen Weg ohne Bewegungsänderung fortsetzen würde.

- a. Die Distanz DIS_1 wird anhand der aktuellen Geschwindigkeit und dem maximalen TTC-Wert (Default: 1,5 Sekunden) berechnet.
- b. DIS_2 ergibt sich aus der Differenz der Positionen zum Zeitpunkt t und $t+1$.
- c. $DIS_2 < DIS_1 \rightarrow$ Wiederholung der Berechnungsschritte a und b sowie Aktualisierung der Distanzen mit:

$$DIS_1 = DIS_1 - DIS_2$$

$$DIS_2 = |Position_{t+2} - Position_{t+1}|$$

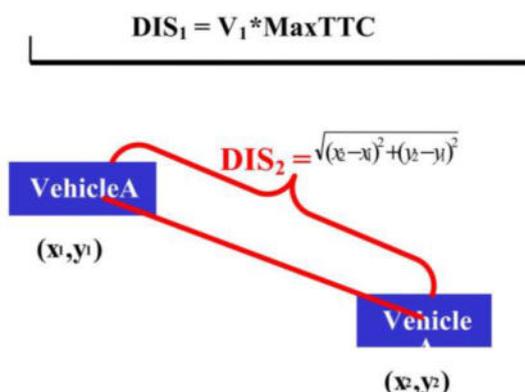


Abbildung 12: Distanzberechnung (Gettman et al., 2008)

- d. $DIS_2 > DIS_1 \rightarrow$ Berechnung der Position, um den Projektionspunkt innerhalb des Segmentes DIS_2 zu lokalisieren.
3. An den jeweiligen Positionen werden der Umfang und die Ausrichtung der Fahrzeuge berechnet, mit dem Raster überlagert und geprüft welche Felder des Rasters von mehr als einem Fahrzeug in seiner projizierten Position belegt sind. Überschneiden sich zwei Fahrzeuge, werden diese als Konfliktpaar in einer Liste gespeichert.
 4. Die TTC jedes Konfliktpaares in der Liste wird aktualisiert, indem iterativ die zukünftige Projektionslinie um eine Zehntelsekunde gekürzt wird bis sich die Flächen der Fahrzeuge in ihrer projizierten Position nicht mehr überschneiden. Dadurch wird eine genauere TTC ermittelt. Sobald sich die Fahrzeuge gerade noch berühren, werden die Konfliktkenngrößen wie MinTTC und die Positionen der Fahrzeuge ermittelt. Auch wenn sich die Fahrzeuge in einem Feld nicht überlappen, bleiben diese in der Konfliktliste erhalten und es wird weiter untersucht, ob sie in einem vorgegebenen Zeitrahmen, definiert durch den Grenzwert von PET, dieselbe Position überfahren. Ist dies der Fall, wird die minimale PET aktualisiert und der Konflikt in der Liste behalten. Wenn ein Konfliktpaar sich nicht mehr auf Kollisionskurs befindet und die minimale PET nicht mehr weiter reduziert werden kann oder sie überschritten ist, wird das Ereignis aus der Liste genommen.

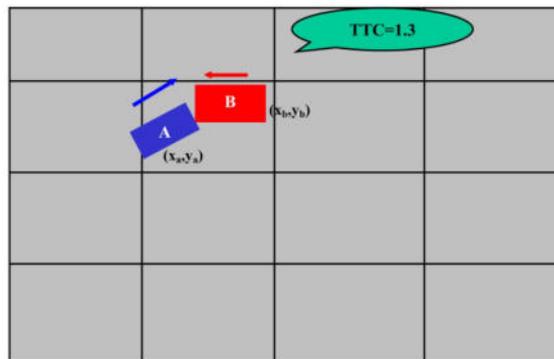


Abbildung 13: Iterative Berechnung von TTC (Gettman et al., 2008)

3.2.3 Konfliktauswertung

Das Ergebnis nach einer Berechnung mit SSAM ist eine Liste mit allen Konflikten, Beschreibung der Konfliktkenngrößen, sowie der geometrischen und kinematischen Rahmenbedingungen der Fahrzeuge. Die Software selbst stellt neben dieser Liste zusätzlich eine Zusammenfassung der Konflikte und auch grafische und statistische Auswertungsmöglichkeiten zur Verfügung. Dabei ist es möglich, Grenzwerte für PET und TTC im Vorfeld festzulegen. Ein wesentliches Element ist das Filtertool in SSAM, da nicht alle Konflikte als gültige Ergebnisse interpretiert werden können. Begründet ist dies von Gettman et al. (2008) darauf, dass trotz einer möglichst realitätsnahen Modellabbildung, sogenannte virtuelle Konflikte entstehen können. Diese treten dann auf, wenn die Logik des Simulationsmodells nicht genau oder vollständig die physikalischen Möglichkeiten des Manövers abbildet. Diese werden von SSAM als Konflikte mit einem TTC-Wert von Null, also im Prinzip in Form einer Kollision, dargestellt. Außerdem werden auch Konflikte mit niedrigen Maximalgeschwindigkeiten, beispielsweise bei Annäherungsmanövern der Folgefahrzeuge in einem Stau irrtümlicherweise als Konflikt erkannt. Und letztendlich können auch Konfliktereignisse mit sehr hohen, unrealistischen Verzögerungsraten auftreten. Aus diesen Aspekten geben sich drei Filterbedingungen, die für eine Auswertung in SSAM wesentlich sind.

$$TTC > 0$$

$$\text{MaxS} > 16,1 \text{ km/h (4,47 m/s)}$$

$$\text{MaxD} > -9,15 \text{ m/s}^2$$

Unabhängig von kinematischen Zusammenhängen, ist SSAM nicht für die Auswertung von Fußgängerkonflikten konzipiert (Pu und Joshi, 2008). Zwar gibt es Ansätze zur Analyse von Konflikten mit Fußgängern beispielsweise von Agarwal (2011) und Wu et al. (2016). Allerdings wird in dieser Arbeit nicht der Fokus darauf gelegt und infolge dieser Konflikttyp vernachlässigt. Prinzipiell ist es in SSAM nicht direkt möglich, Konflikte nach Modi zu filtern, allerdings kann dieses Problem über die Fahrzeuglänge umgangen werden. Um die Fußgänger aus der Auswertung auszuschließen ergibt sich somit eine weitere Filterbedingung mit:

$$\text{First(Second)Length} > 1 \text{ m}$$

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass SSAM nur einen geringen Teil an Filteroptionen zur Verfügung stellt. So ist eine Filterung über die Fahrzeuglänge oder die Simulationszeit beispielsweise nicht möglich. Allerdings können die Konfliktlisten als *.csv-Files (Comma-separated values) exportiert und weiterverarbeitet werden.

3.3 Kalibrierung von Verkehrsflussmodellen unter Berücksichtigung von Konflikten

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Elemente der Kalibrierung von verkehrlichen und konfliktbezogenen Kenngrößen aufgeführt. Eingegangen wird dabei auf grundlegende Aspekte der Kalibrierung, ein kurzer Abriss der wichtigsten Fehlermaße sowie bereits durchgeführte Studien zu dieser Thematik.

3.3.1 Kalibrierung verkehrlicher Parameter

Das Ziel von Verkehrsmodellen ist eine möglichst reale Abbildung des Verkehrsgeschehens in vereinfachter und verkleinerter Form zu generieren. Um dies zu erreichen, ist eine Kalibrierung des Modells unabdingbar, da ansonsten kein Anspruch an dessen Gültigkeit gestellt werden kann. Die Kalibrierung umfasst alle Prozesse, die eine Anpassung des Modells gemäß den realen Bedingungen forcieren. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um eine Anpassung der veränderlichen Modellparameter, sodass die Simulation so gut wie möglich, die realen Verhältnisse abbildet. Als Referenz für das reale Abbild werden empirische Messdaten herangezogen, die durch die eine Vielzahl unterschiedlicher Verhaltensaktionen von Einzelfahrzeugen entstehen und meist in aggregierter Form vorliegen, wie beispielsweise Verkehrsstärken, Reisezeiten oder Staulängen. Diese sind je nach Anwendungsfall zu wählen und werden den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Zur quantitativen Bewertung der Abweichung zwischen Realität und Simulation wird ein Fehlermaß herangezogen, das im Zuge der Kalibrierung iterativ über die Parametrierung des Modells zu minimieren ist. Eng im Zusammenhang mit der Kalibrierung steht die Validierung des Modells, mit der nachgewiesen wird, dass mit den Parametereinstellungen mindestens ein empirischer Datensatz nachgebildet werden kann. Da dafür allerdings mehrere Datensätze notwendig sind, kann auch auf Kosten der Aussagekraft in Ausnahmefällen auf eine anschließende Validierung verzichtet werden. (FGSV, 2006) Der hier beschriebene Prozess ist in reduzierter Form der Abbildung 14 zu entnehmen.

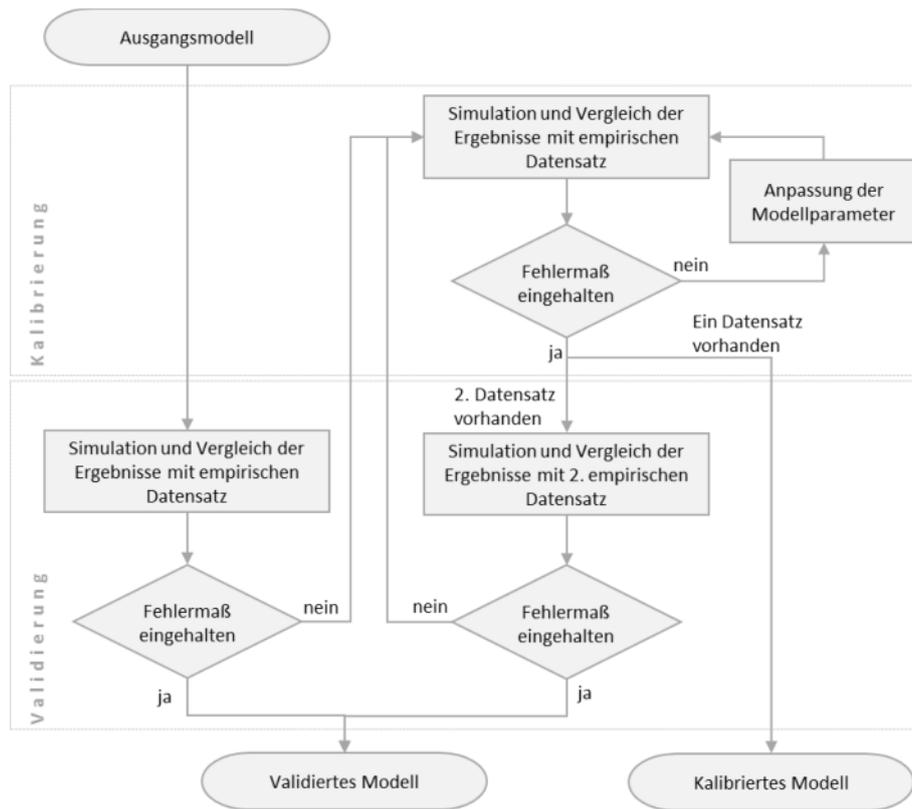


Abbildung 14: Kalibrierungs- und Validierungsverfahren nach FGSV (2006) [vereinfachte Darstellung]

Für die Kalibrierung von verkehrlichen Kenngrößen stehen unterschiedliche Fehlermaße zur Verfügung, die entsprechend der Datengrundlage zu wählen sind. Eine umfassende Gegenüberstellung dieser Fehlermaße ist von Detering (2011) erstellt worden und ein Auszug davon in Tabelle 4 ersichtlich.

Tabelle 4: Fehlermaße (Detering, 2011)

Mean Error (ME)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)$
Mean Percent Error (MPE)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - y_i}{y_i} \right)$
Mean Absolute Error (MAE)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - y_i $
Mean Absolute Percent Error (MAPE)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{x_i - y_i}{y_i} \right $
Root Mean Squared Error (RMSE)	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$
Root Mean Squared Percent Error (RMSPE)	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{x_i - y_i}{y_i} \right ^2}$
Korrelationskoeffizient (r)	$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y}$

x_i ... Simulierter Wert der Kenngröße

y_i ... Empirischer Wert der Kenngröße

n ... Anzahl der berücksichtigten Werte

Der ME und MPE stehen für die Abweichung in absoluten Zahlen bzw. für die relative Abweichung in Prozent. Laut Detering (2011) sind diese Fehlermaße für die Kalibrierung ungeeignet, da sie keine Garantie für eine gute Übereinstimmung liefern, sondern lediglich auf eine Unter- bzw. Überschätzung hinweisen. Soll der Betrag dieser beiden Fehlermaße betrachtet werden, spricht man von MAE und MAPE. Der RMSE und RMSPE sind häufig verwendete Fehlermaße. Hierbei werden Ausreißer mit überproportionalem Gewicht miteinbezogen. Der Korrelationskoeffizient ermöglicht den Schluss eines linearen Zusammenhangs zwischen zwei Größen. Die Werte können zwischen -1 und +1 liegen, wobei der Zusammenhang zwischen den beiden zu vergleichenden Werten mit einer Annäherung an Null abnimmt. Ein weiteres noch nicht behandeltes Fehlermaß ist die GEH-Statistik, die speziell zur Ermittlung der Abweichung von Verkehrsflüssen dient. Berechnet wird dieser Wert wie folgt:

$$GEH = \sqrt{\frac{2 \times (Fl_{sim} - Fl_{obs})^2}{Fl_{sim} + Fl_{obs}}}$$

Fl_{sim} ... simulierter Wert

Fl_{obs} ... beobachteter Wert

Es handelt sich bei der GEH-Statistik um eine empirische Formel, die es ermöglicht die Abweichungen zwischen Messung und Simulation darzustellen. Eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Werten ist dann gegeben, wenn der GEH-Wert kleiner oder gleich 5 ist. (Archer, 2005)

Neben der Wahl des passenden Fehlermaßes ist die Auswahl an Parametern, die für die Kalibrierung herangezogen werden, essentiell. Problematisch ist hierbei, dass mit zunehmender Komplexität und Anzahl der Parameter der Zusammenhang zwischen Modellinput und -output nicht mehr erkennbar ist und somit eine Black Box darstellt. Zur Reduktion dieser Vielzahl an Parametern kommt meist „Trial and Error“ zur Anwendung, während ein systematischerer Zugang über Optimierungsalgorithmen in selteneren Fällen gewählt wird (Qiao et al., 2012). Kalibrierungsansätze verkehrlicher Kenngrößen inklusive methodischer Auswahl an Parametersätzen sind beispielsweise von Park und Schneeberger (2003), Park und Qi (2005), Park und Won (2006), Miller (2009) und Yu und Fan (2017) durchgeführt worden.

3.3.2 Kalibrierung verkehrlicher Parameter hinsichtlich Konflikte

Auch wenn durch die Verkehrskonflikttechnik ein wichtiger Grundstein für die Verkehrssicherheitsanalysen gelegt wurde, ist die Integration dieser in die Verkehrsmodellierung bisher langsam vorangeschritten und befindet sich nach wie vor in einem frühen Entwicklungsstadium (Young et al., 2014). Dies schlägt sich in der Kalibrierung sicherheitsrelevanter Aspekte nieder, die nur bedingt auf Methoden der verkehrlichen Kalibrierung zurückgreifen kann. Ein gut auf verkehrliche Kenngrößen kalibriertes Verkehrsmodell ist demnach noch keine Garantie für eine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und realen Konflikten (Astarita und Giofré, 2019). An dieser Problematik schließen die Studien von Cunto und Saccomanno (2008) an. Sie entwickelten die Konfliktkenngröße CPI, die sich aus der Wahrscheinlichkeit ergibt, dass die Verzögerungsrate zur Vermeidung des Unfalls die höchstmögliche Verzögerungsrate überschreitet. Anhand dieser Kenngröße haben sie eine auf Optimierungsalgorithmen basierende Kalibrierung unter Berücksichtigung sicherheitsspezifischer Aspekte vollzogen. Habtemichael und de Picado-Santos (2013) haben eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um mittels t-Test zu überprüfen, ob und inwiefern Einstellungen ausgewählter Folge- und Querverhaltensparameter auf die in SSAM ermittelte Konflikanzahl haben. Im Fokus stand dabei weniger eine Methode der Kalibrierung zu entwickeln, sondern vielmehr eine Empfehlung für mögliche Parametereinstellungen zur Konfliktkalibrierung zu geben. Einen sehr ausführlichen Kalibrierungsansatz stellen Huang et al. (2013) vor. Ziel dieser Studie war es, zu untersuchen, ob die in SSAM ermittelten Konflikte eine valide Abschätzung für die real beobachteten Konflikte darstellen. Er schlägt dafür ein zweistufiges Modell vor, das im ersten Schritt eine Kalibrierung verkehrlicher Daten und im zweiten Schritt eine Kalibrierung von Konflikten forciert. Dafür wurden zunächst Geschwindigkeiten, Verkehrsflüsse, Zeitlückenabstände über Fahrverhaltensparameter soweit angepasst, dass eine gute Übereinstimmung erzielt werden konnte. Im zweiten Schritt wurde durch die Variation der Grenzwerte von TTC eine Reduktion des Fehlermaßes bezüglich Konflikanzahl angestrebt, wobei die Feldmessungen mittels Videoaufzeichnungen generiert wurden. Im Zuge dessen betonen die Autoren auch die Notwendigkeit, das Netz auf geometrische Ungenauigkeiten zu überprüfen. Die Ergebnisse zeigten gute Übereinstimmungen bei Rear-End- und Crossing-Konflikten, jedoch nicht bei Lane-Change-Konflikten. Insgesamt betrachtet, erweist sich dieser Kalibrierungsansatz, dessen struktureller Ablauf in Abbildung 15 ersichtlich ist, trotz allem als geeignet zur Untersuchung von sicherheitsbezogenen Aspekten.

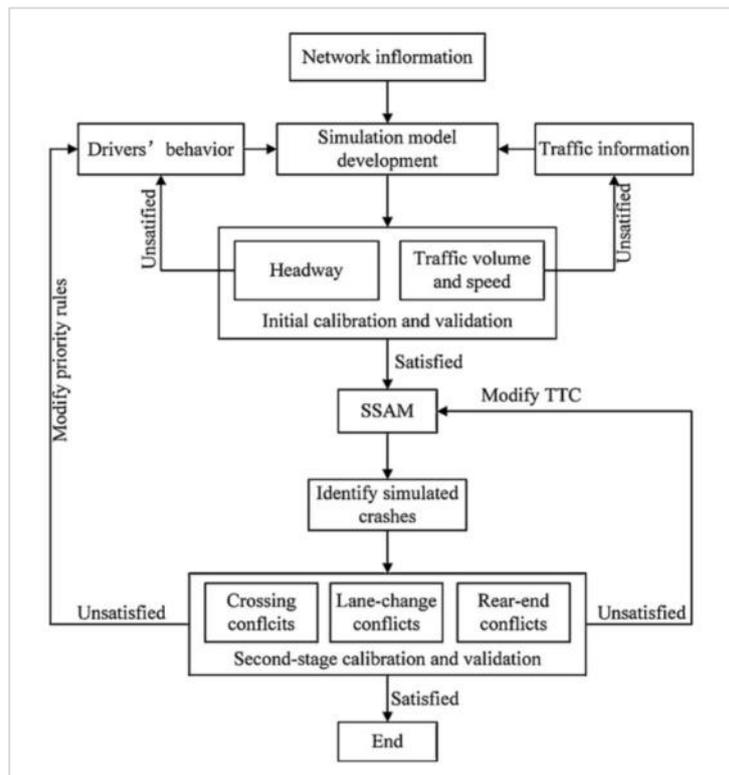


Abbildung 15: Zweistufiges Kalibrierungsverfahren (Huang et al., 2013)

Die hier erwähnten Studien liefern die methodische Basis für das weitere Vorgehen sowohl bezüglich Auswahl der Parametersätze als auch der Vorgehensweise. Diese Methodik wird im nächsten Kapitel beschrieben.

4 Methodische Vorgehensweise

An dieser Stelle werden die wesentlichen methodischen Eckpunkte dieser Studie dargelegt. Erläutert werden dabei die Untersuchungsmethode, Aspekte der Datenaufbereitung sowie des Versuchsplanes und die einzelnen, im Zuge der Netzvorbereitung gesetzten Schritte zur Szenariengenerierung.

4.1 Untersuchungsmethode

In dieser Arbeit wird ein mehrstufiges Verfahren zur Untersuchung herangezogen, das als methodisches Grundgerüst zur Kalibrierung des Verkehrsflussmodells unter Berücksichtigung sicherheitsspezifischer Aspekte dient. Dabei wird nicht nur eine iterative Anpassung des Modells an reale Verhältnisse angestrebt, sondern es werden auch Parameterstudien zu ausgewählten sicherheitsrelevanten Themenbereichen miteinbezogen. Am Beginn des Verfahrens steht die mikroskopische Verkehrsflusssimulation, die in VISSIM durchgeführt wird. Anhand der in den Abschnitt 3.1 behandelten Modellen der Längs- und Querdynamik und den Rahmenbedingungen der Simulationsumgebung wird zu jedem festgesetzten Zeitintervall der Systemzustand berechnet. Der grundlegende Systemoutput sind somit Fahrzeugtrajektorien, in denen Position und Bewegungszustände zu jedem Zeitschritt enthalten sind. Diese werden in weiterer Folge in Form von aggregierten verkehrlichen Kenngrößen für die Kalibrierung herangezogen. Dabei werden die Simulationsergebnisse den empirisch erhobenen Messdaten gegenübergestellt sowie deren Abweichung mittels eines Fehlermaßes quantitativ bewertet und entspricht damit dem in Unterabschnitt 3.3.1 behandelten grundlegenden Prozess der Kalibrierung. Die einzelnen Fahrzeugtrajektorien sind hingegen wesentlich für sicherheitsspezifische Analysen, insbesondere für die Konfliktpunktanalyse in SSAM. Anhand der daraus extrahierten zeitlichen und räumlichen Distanzen werden nach dem in Unterabschnitt 3.2.2 beschriebenen Algorithmus die Konfliktereignisse ermittelt und die dazugehörigen Konfliktpaare in einer Liste gespeichert. Für die daran anschließende Ergebnisauswertung kommen zwei unterschiedliche Verfahren zur Anwendung. Im ersten Fall werden nach der in Unterabschnitt 3.2.3 beschriebenen Filterung alle unrealistischen Konflikte eliminiert und anschließend über die Konflikanzahl und -kenngrößen, die lokale Verteilung im Netz sowie durch die Simulationsanimation hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft. Der zweite Weg bedient sich der nanoskopischen Unfallsimulation. Dabei werden die Fahrzeugtrajektorien und die Konfliktliste an PC-Crash übergeben und nanoskopisch unter Einbezug kinematischer Rahmenbedingungen nachsimuliert mit fahrdynamisch detailliert generierte Bewegungstrajektorien als Ergebnis. Fahrdynamische Aspekte werden in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation nur bedingt berücksichtigt und somit werden teils unrealistische Fahrzeugtrajektorien generiert, die nicht nanoskopisch simuliert werden können. Anhand dieser Trajektorien können Ursachen für unrealistische Fahrmanöver der Simulationsfahrzeuge im Verkehrsflussmodell gefunden und mittels Parametrierung behoben werden. Zusätzliche Analysen sind letztendlich über die direkte Betrachtung der mikroskopisch generierten Fahrzeugtrajektorien ohne Auswertung der Konflikte möglich. So wurden sie in dieser Arbeit genutzt, um Detailstudien zur Sichtweite an Knotenpunkten oder zur Anpassung an fahrdynamische Rahmenbedingungen durchzuführen. Über diese drei Wege werden die Trajektorien auf unterschiedliche Weise hinsichtlich ihrer Plausibilität untersucht. Auch wenn die Verifizierung der Konflikte und folglich der Fahrzeugtrajektorien aufgrund des fehlenden Vergleiches mit empirisch erhobenen Messdaten eingeschränkt ist, unterstützen diese drei Verfahren eine gezielte Parametrierung des Verkehrsmodells und damit die iterative Anpassung an das reale Verkehrsgeschehen. Das Gesamtergebnis ist ein Verkehrsmodell, kalibriert hinsichtlich verkehrlicher und konfliktbezogener Kenngrößen, das eine höhere Genauigkeit bezüglich

der Fahrzeugbewegungen zur Verfügung stellt und damit eine solide Grundlage für verkehrssicherheitspezifische Untersuchungen liefert.

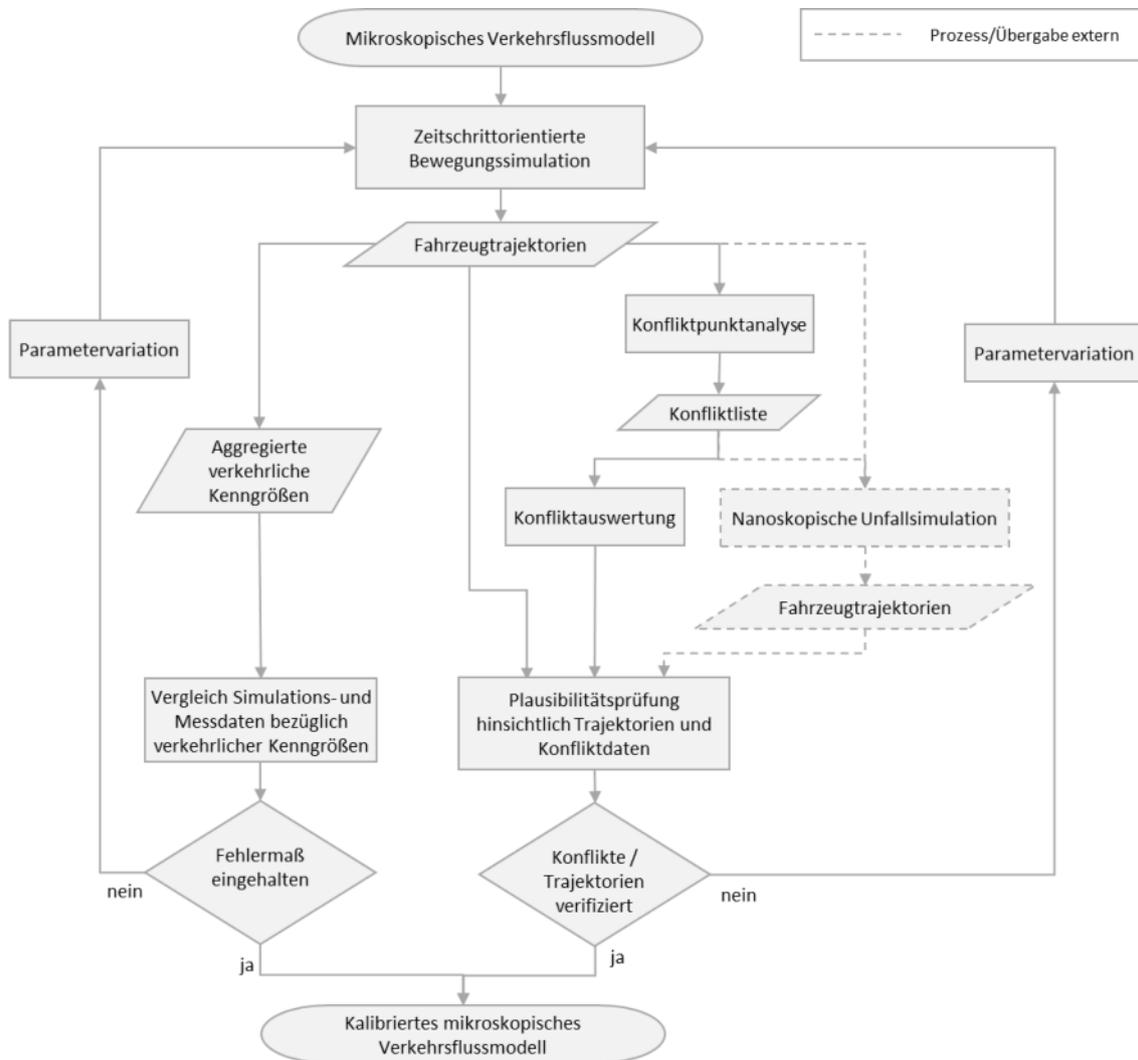


Abbildung 16: Ablauf der Untersuchung

4.2 Aufbereitung der Daten

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Schritte zur Aufbereitung der Daten beschrieben. Dafür wird als Grundlage eine kurze Beschreibung des Untersuchungsgebietes vorangestellt. Dieses liegt im Grazer Stadtgebiet und erstreckt sich entlang der Ost-West-Achse von der Keplerstraße bis zur Heinrich- bzw. Humboldtstraße mit den dazugehörigen Ausläufern auf der Nord-Süd-Achse und umfasst acht signalisierte Knotenpunkte (Abbildung 17). Neben dem motorisierten Individualverkehr (MIV) durchfahren auch Linien des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) das Gebiet, wobei diese zum Teil schienengebunden sind. Zusätzlich ist für den Fahrradverkehr entlang der West-Ost-Achse eine getrennte Radverkehrsanlage vorhanden. Durchgeführt wurden die Studien auf Basis eines bereits bestehenden Verkehrsmodells aus diesem Untersuchungsgebiet, wobei detaillierte Ausführungen dazu dem Abschnitt 4.4 zu entnehmen sind.

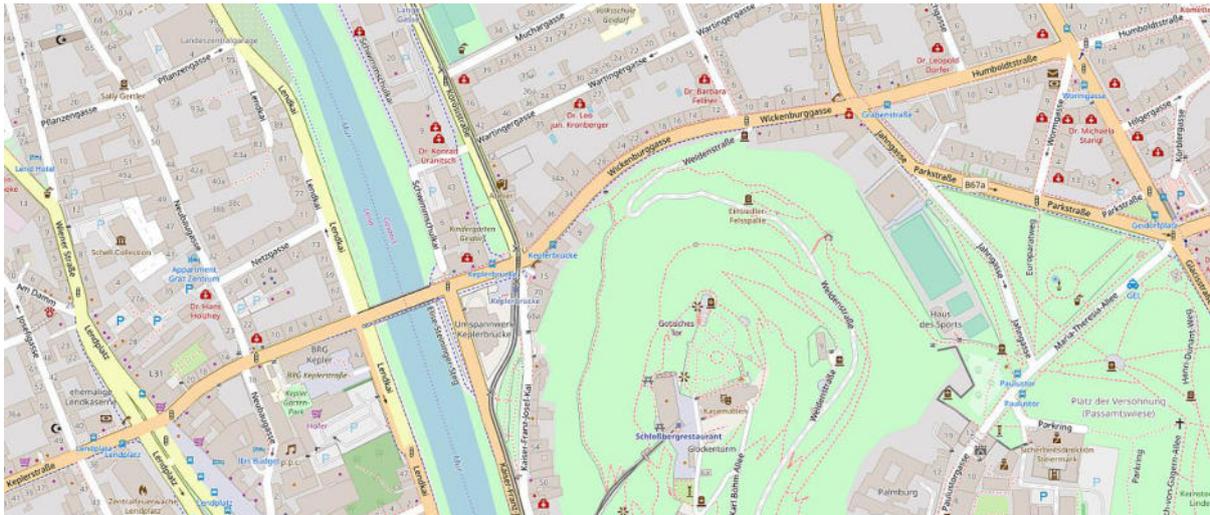


Abbildung 17: Untersuchungsgebiet Wickenburggasse

4.2.1 Messdaten Verkehrsbelastung

Zur Überprüfung der Verkehrsstärke konnten Detektordaten der Stadt Graz herangezogen werden. Diese umfassen Querschnittsmessungen aus dem Untersuchungsgebiet im Jänner 2016. In Tabelle 5 sind die Namen der Querschnittsmessungen im Modell denen der Zählstellen der Stadt Graz gegenübergestellt.

Tabelle 5: Überblick Zählstellen

Querschnittsmessung Modell	Zählstelle Stadt Graz
Kaiser_17_1	ig14FD501_D13_501.71
Kaiser_17_2	ig14FD501_D14_501.72
Kaiser_17_3	ig14FD501_D16_501.74
Kaiser_17_4	ig14FD501_D17_501.75
Kepler_16_1	ig14FD501_D19_501.83AD
Kepler_16_2	ig14FD501_D20_501.84AD
Kepler_18_1	ig14FD501_D19_501.81
Kepler_18_2	ig14FD501_D20_501.82
Parkst_15_1	es11FD504_D8_504.51
Parkst_15_2	es11FD504_D9_504.52
Parkst_15_3	es11FD504_D10_504.53
Wicken_12_1	ig14FD501_D8_501.21
Wicken_12_2	ig14FD501_D9_501.22
Wicken_18_1	ig14FD501_D10_501.23AD
Wicken_18_2	ig14FD501_D11_501.24AD

Die Namensgebung der Messquerschnitte in VISSIM bezieht sich einerseits auf deren Position und andererseits auf die Nummer des Fahrstreifens. Ein Überblick über das durch Zählstellen abgedeckte Gebiet ist aus den Abbildungen 18 und 19 ersichtlich.

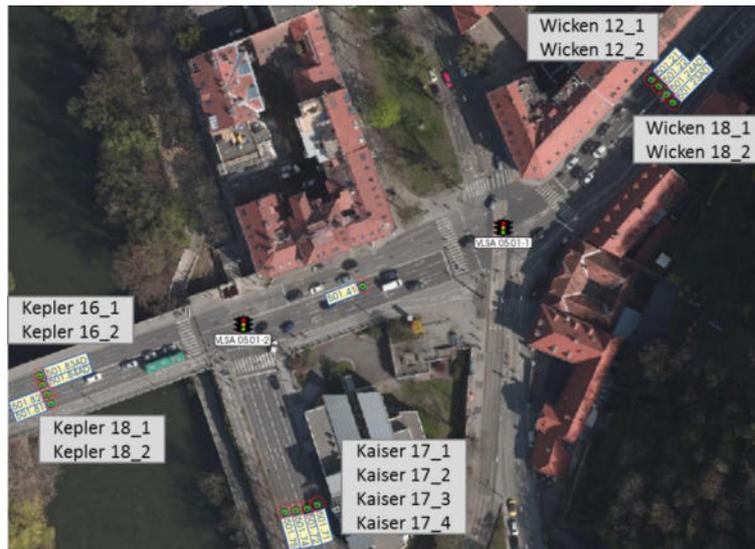


Abbildung 18: Zählstellen Keplerbrücke



Abbildung 19: Zählstellen Geidorfplatz

Die Detektordaten sind im Zeitraum von 18. Jänner bis 24. Jänner 2016 über alle 24 Stunden vorhanden. Für die hier durchgeführte Untersuchung wurden die Daten einerseits auf die im Modell definierte Spitzenstunde von 7:15 bis 8:15 reduziert und andererseits nur die Werktage für die Untersuchung herangezogen. Die Messungen wurden in 15-Minutenintervallen jeweils auf eine Stunde hochgerechnet. Der für die Kalibrierung herangezogene Stundenwert pro Zählstelle ergibt sich somit aus den zeitlich gefilterten Daten gemittelt über die Tage und Anzahl der Intervalle. In Abbildung 20 sind die Lageparameter der fünf Messtage in einem Boxplot zusammengefasst.

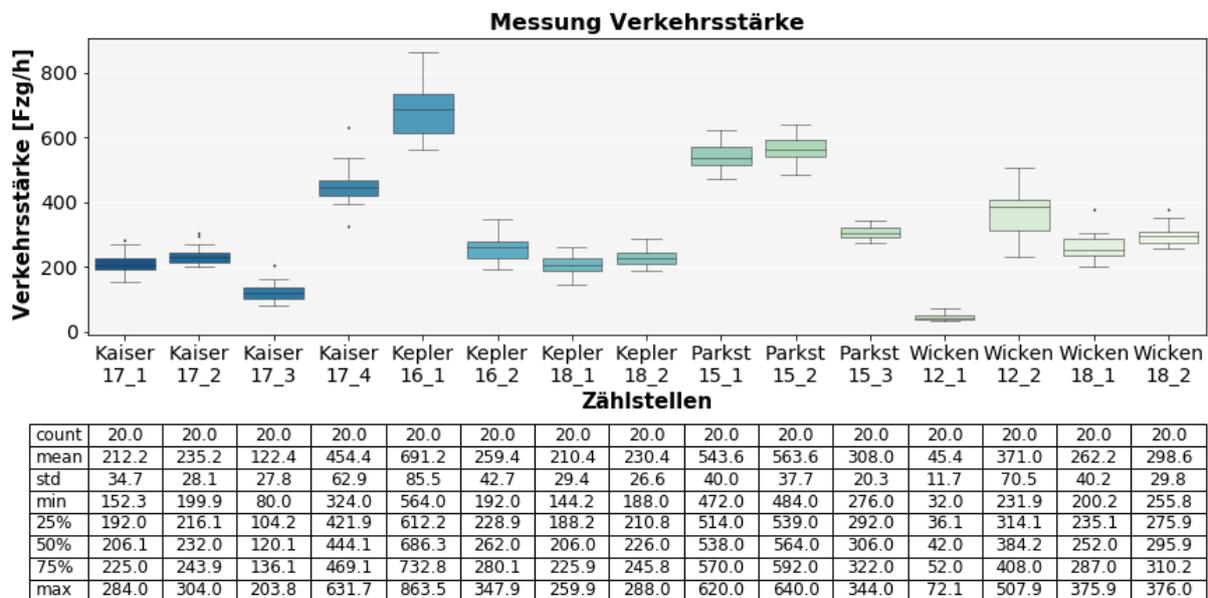


Abbildung 20: Messwerte Zählstellen

Bei den meisten Querschnitten befindet sich die Verkehrsstärke zwischen 100 und 300 Fahrzeuge pro Stunde. Ausnahmen sind vor allem in der Parkstraße, aber auch am Beginn der Wickenburggasse, sowie Kaiser-Franz-Josefs-Kai und auf der Keplerbrücke in Richtung Lendplatz zu verzeichnen. Die Streuung liegt bei den meisten Querschnitten zwischen 25 und etwas über 40 Fahrzeugen. Es zeigt sich jedoch, dass am Querschnitt Kepler_16_1 und Wicken_12_2 die Streuung fast doppelt so hoch liegt als bei vergleichbaren Wertebereichen. Auffallend ist, dass an den Querschnitten oft sehr große Unterschiede zwischen den Fahrstreifen zu beobachten sind. Dies ist beispielsweise am Beginn der Wickenburggasse am Querschnitt Wicken_12 der Fall. Die Ursache dafür könnte darin liegen, dass an dieser Stelle eine Bushaltestelle liegt und daraufhin Fahrzeuge dazu tendieren, die zweite Fahrspur zu nutzen, um dem aus- und einfahrenden Busverkehr auszuweichen. Das Gefälle am Querschnitt Wicken_16 ist hingegen auf die Abbiegerelationen am stromabwärts liegenden Lendplatz und die dadurch beeinflusste Fahrstreifenwahl zurückzuführen. Ebenso davon beeinflusst ist der Kaiser-Franz-Josef-Kai in Richtung Keplerstraße (Kaiser_17_1, Kaiser_17_2), wobei hier zusätzlich die Tendenz besteht, die äußerste, linke Fahrspur zu nutzen. In der Parkstraße fällt vor allem der Verkehr in Richtung Heinrichstraße (Parkst_15_3) im Vergleich zu dem in Richtung Glacisstraße (Parkst_15_1, Parkst_15_2) geringer aus. Diese Diskrepanzen im Zusammenhang mit den Fahrstreifen zeigten sich auch in Folge der Kalibrierung als eine herausfordernde Komponente.

4.2.2 Messdaten Reisezeit

Um neben der Verkehrsbelastung eine weitere verkehrliche Kenngröße in der Kalibrierung berücksichtigen zu können, wurde auch die Ermittlung der Reisezeit in Betracht gezogen, wofür allerdings keine Messdaten vorhanden waren. Aus diesem Grund wurde hierfür eine Messfahrt entlang der Wickenburggasse Ende Juni 2018 zur Spitzenstunde durchgeführt und mit der App Androsensor Daten aufgezeichnet. Diese App ermöglicht es unter anderem Koordinaten, Beschleunigung, Geschwindigkeiten, Zeit und Schallpegel während der Fahrt zu messen. Nach Erhebung wurden die Daten an ArcGIS übergeben und dort anhand der gemessenen Koordinaten die Trajektorien erstellt. Als Referenz wurden vier im Modell vorhandene Reisezeitmessabschnitte herangezogen, die in Abbildung 21 ersichtlich

sind. Die Namensgebung der Reisezeitmessabschnitte setzt sich aus der Himmelsrichtung sowie der Start- und Endstrecke des Abschnittes zusammen.



Abbildung 21: Reisezeitabschnitte

Die hier gesammelten Daten sind jedoch als Richtlinie zu sehen und nicht als allgemeingültige Werte, da einerseits Veränderungen der Infrastruktur zu verzeichnen sind und andererseits der Datensatz mit nur fünf Messfahrten relativ gering gehalten ist.

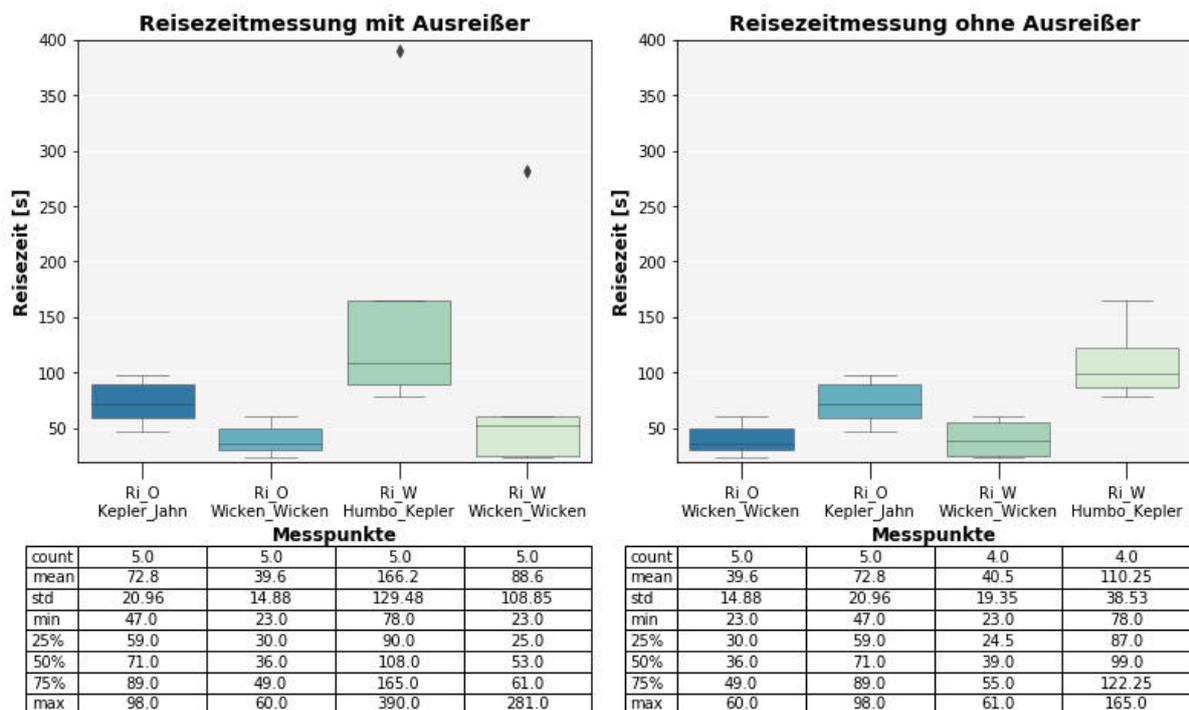


Abbildung 22: Reisezeitmessungen mit und ohne Ausreißer

Die Ergebnisse der Reisezeit zeigen, dass es bei einer Fahrt zu Ausreißern kommt, wodurch sich die Standardabweichung und der Mittelwert deutlich erhöhen. Diese wurden folglich dem Datensatz entnommen, sodass in Richtung Westen nur mehr vier Messungen berücksichtigt werden. Die beiden kürzeren Abschnitte in der Wickenburggasse liegen beide ungefähr im gleichen Wertebereich und weisen ähnliche Quartilsabstände auf. Auffallend ist, dass trotz der Entnahme der Ausreißer der Messabschnitt zwischen Humboldtstraße und Keplerbrücke (Humbo_Kepler) deutlich höhere Reisezeiten aufweist als in der Gegenrichtung. Da bezüglich Länge sich die beiden Abschnitte nur geringfügig unterscheiden, ist dies eher auf die Wartezeiten an den VLSA (Verkehrslightsignalanlage) zurückzuführen.

4.2.3 Verkehrliche Daten aus VISSIM

Für die unterschiedlichen Analysen wurden Querschnittsmessungen, Fahrzeurreisezeitmessungen (Attributdateien, *.att), SSAM-Trajektorien (*.trj) sowie Fahrzeugprotokolle (*.fzp) aus VISSIM in Form von Ergebnisdateien gespeichert. Bei den ersten beiden Ausgabedateien besteht die Möglichkeit, die Ergebnisse in Intervallen zu speichern. Da aber in dieser Arbeit die SSAM Auswertung im Vordergrund steht und die Intervalleinstellungen keinen Einfluss auf dessen Ergebnisse haben, wurde darauf verzichtet. Für die Simulation wurde eine Vor- und Nachlaufzeit von 15 Minuten (900 Sekunden) eingestellt. Somit wurde nur die Morgenspitze zwischen 7:15 (Simulationssekunde 900) und 8:15 (Simulationssekunde 4500) in den Messergebnissen aufgezeichnet. Um die stochastischen Schwankungen des Verkehrs berücksichtigen zu können, ist es erstrebenswert mehrere Simulationsläufe durchzuführen. Dadurch wird in VISSIM mit jedem Lauf eine neue Startzufallszahl für die stochastischen Verteilungen in der Simulation herangezogen. Diese Variation der Startzufallszahl verändert die Simulationsergebnisse und ermöglicht es, Auswirkungen der stochastischen Schwankungen in die Analyse zu miteinzubeziehen (PTV 2016). In dieser Arbeit sind pro Simulation zehn Durchläufe vollzogen worden. Wie bereits in Unterabschnitt 4.2.1 behandelt, wurde für den gemessenen Wert

der Mittelwert über alle Intervalle und alle Messtage verwendet, der in der Simulation über das Attribut *Fzge(Avg,Avg,Alle)* ausgegeben wird. Gezählt werden hierbei alle Fahrzeuge im Simulationszeitraum, in diesem Fall eine Stunde (Simulationssekunde 900-4500) pro Simulationsdurchlauf und dann anschließend gemittelt über alle zehn Durchläufe. Als Fehlermaß kam hierfür die GEH-Statistik zur Anwendung. Für die Reisezeit hingegen wurde der RMSPE als Fehlermaß herangezogen. Dieser wird berechnet, indem der Mittelwert aus der Messung mit den Ergebnissen des Attributes *Rsz(Simulationslauf, Avg,Alle)* des jeweiligen Simulationsdurchlaufs verglichen wird. Die ebenfalls in VISSIM generierten Fahrzeugprotokolle speichern Informationen über jedes Fahrzeug zu jedem Simulationszeitschritt. Unter anderem beinhalten sie Koordinaten der momentanen Fahrzeugposition, Geschwindigkeit und Beschleunigung. In dieser Arbeit wurden sie vorrangig genutzt, um Bewegungsvorgänge der Fahrzeuge einzeln oder zusammengefasst abzubilden.

4.2.4 Konfliktdaten aus SSAM

Für die Konfliktauswertung kommt hier SSAM in der Version 2.1.6 zum Einsatz, wobei eine Kompatibilität bis zu VISSIM 9 gegeben ist und dieses daher hier verwendet wird. Begonnen wird mit einer Übergabe der in VISSIM generierten *.trj-Dateien aus allen 10 Simulationsläufen an SSAM. Vor der Auswertung in SSAM ist es möglich die Grenzwerte für TTC und PET festzulegen und überdies die Konfliktwinkel für die unterschiedlichen Konflikttypen zu definieren. In dieser Arbeit wurden für die Auswertungen nur die Defaulteinstellungen mit einem TTC Wert von 1,5 Sekunden und einem PET Wert von 5 Sekunden herangezogen, da sich diese bereits in anderen Studien, beispielsweise von Sayed et al. (1994), Hayward (1972) oder Hydén (1987), als geeignete Grenzwerte erwiesen haben. (Gettman et al., 2008)

Die in Unterabschnitt 3.2.3 angeführten Filterbedingungen wurden mit der Simulationszeit ergänzt, da im Modell eine Vor- und Nachlaufzeit implementiert ist, die in der Konfliktauswertung zu berücksichtigen ist. Alle Filterbedingungen, die für die Auswertung verwendet wurden, sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Filterbedingungen in SSAM

Parameter	Filterbedingung
Time to Collision	$0 < \text{TTC} \leq 1,5 \text{ s}$
Maximale Geschwindigkeit	$\text{MaxS} > 16.1 \text{ km/h}$
Maximale Beschleunigung	$\text{MaxD} > -9.15 \text{ m/s}^2$
Fahrzeuglänge	$\text{First(Second)VehicleLength} > 1 \text{ m}$
Simulationssekunde	$900 > \text{tMinTTC} \geq 4500 \text{ s}$

Der in SSAM generierte Datensatz enthält Konflikte aus allen zehn Simulationsläufen. Für die Analyse der Kenngrößen kann dieser direkt herangezogen werden und anhand dessen die Lageparameter ermittelt werden. Um hingegen von den zehn Simulationsläufen auf die Anzahl der Konflikte in der Spitzenstunde zu kommen, ist ein gemittelter Wert heranzuziehen. Dafür wird je Simulationslauf die Konfliktdanzahl eruiert und anschließend daraus der Mittelwert gebildet. Dieses Vorgehen wird nicht nur bei den Gesamtkonflikten angewandt, sondern auch für die einzelnen Konflikttypen. Zusätzlich zu diesen Auswertungen wird die Verortung der Konflikte im Netz mitberücksichtigt, wofür wiederum der

Datensatz mit allen zehn Simulationsläufen herangezogen wird. Anhand der in SSAM angegebenen Konfliktpunktkoordinaten werden diese mittels Python in einer Grafik zusammengefasst und mit dem VISSIM-Netz überlagert.

4.3 Skriptbasierte Umsetzung der Datenanalyse und Simulation

Ein wesentliches Element für die Umsetzung der Studie war die skriptbasierte Modellierung und Datenanalyse. Zur Anwendung kam dabei die Skriptsprache Python in der Version 3.6, mit der in der Entwicklungsumgebung Spyder 3.2.8 gearbeitet wurde. Der Vorteil von Python liegt in der einfachen Syntax und dem großen Angebot von integrierbaren Paketen unter anderem für Datenanalysen. Zusätzlich wurden für die in dieser Studie vorhandenen Problemstellungen eigene Funktionen (Module) erstellt und in vier Paketen (*.py) zusammengefasst. Diese sind in Abbildung 23 mit den jeweiligen Modulen ersichtlich. Die Datenanalyse beinhaltet neben Berechnungen von Mittelwerten und Fehlermaßen auch Ermittlung der Konflikanzahl und Lageparameter. Das Modul Diagramme und Grafiken umfasst alle grafischen Auswertungen. Alle fahrdynamischen Berechnungen, wie Distanzberechnungen oder Parameter der Bewegungsgleichungen werden im Modul Fahrdynamik erfasst. In VISSIM ist es möglich, Modellierungsschritte über eine COM-Schnittstelle (Component Object Model) durchzuführen. Die für diese Studie relevantesten Schritte wurden im Paket VISSIM in eigene Module zusammengefasst.

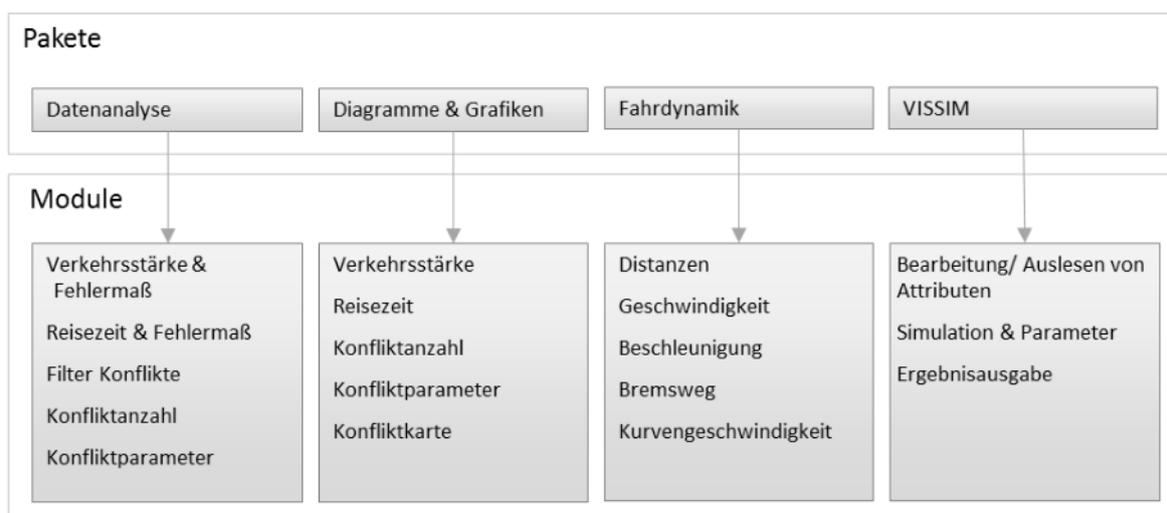


Abbildung 23: Pakete in Python

Anhand eines Flussdiagramms in Abbildung 24 wird der wesentliche Ablauf der hier angewandten skriptbasierten Modellierung und Datenauswertung dargestellt. Für die Simulation ist es notwendig über das Skript Simulation.py zunächst VISSIM zu starten und eine Verbindung zum COM-Server aufzubauen. Anschließend werden über das importierte Paket funcVISSIM.py die benötigten Module geladen. Dabei wird zunächst der Parameter und dessen Einstellung an VISSIM übergeben, danach die Simulation mit den gewünschten Simulationsparametern gestartet und die entsprechenden Ergebnisdateien ausgewählt und deren Dateipfad angegeben. In einem neuen Steuerungsskript (Auswertung_V.py) werden die Ergebnisdateien *.att eingegeben, die Informationen über die verkehrlichen Kenngrößen enthalten. Zusätzlich werden die bereits aufbereiteten Messdaten eingelesen. Über das Ausführungsskript werden die Daten aus VISSIM entsprechend aufbereitet, mit den Messdaten und den berechneten Fehlermaßen in einen Datensatz zusammengefasst und anschließend als Excel-Datei (*.xlsx) gespeichert. Um die dazugehörigen Grafiken zu generieren, wird diagrams.py aufgerufen

und die erstellten Abbildungen als *.png (Portable Network Graphics) Datei gespeichert. Für die Konfliktauswertung ist es hingegen notwendig, zunächst manuell die *.trj-Dateien an SSAM zu übergeben. Die darin ausgewertete Konfliktliste wird dann in Form einer *.csv-Datei exportiert. Mit dem Skript Auswertung_K.py wird diese Konfliktliste eingelesen und anschließend über die Module gefiltert. Zusätzlich werden die Konfliktnzahl und die Lageparameter bestimmt und letztendlich die wichtigsten Ergebnisse tabellarisch und grafisch gespeichert.

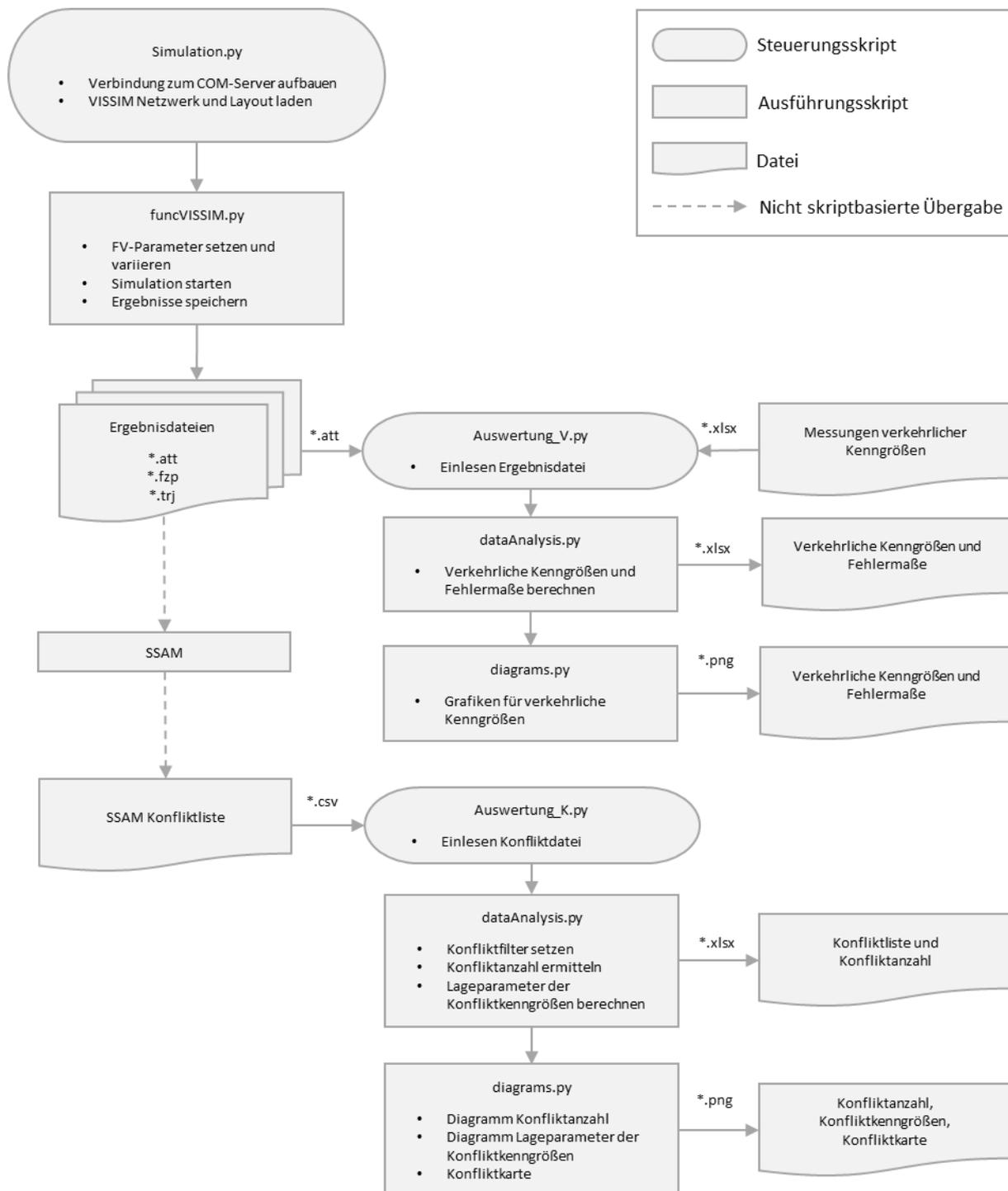


Abbildung 24: Flussdiagramm Python zur Simulation und Auswertung

Dieser Ablauf ist am Beispiel der Parametervariation der Fahrverhaltensparameter dargestellt und variiert bei unterschiedlichen Auswertungen. Ebenso wurden zusätzlich Skripte erstellt, die immer wieder für einzelne Auswertungen herangezogen werden, auf die aber nicht detailliert eingegangen wird.

4.4 Generierung der Szenarien

In dieser Arbeit kommt ein bereits bestehendes Verkehrsmodell zur Anwendung, das im Rahmen einer Machbarkeitsstudie bezüglich Fahrstreifenreduktion zur Verbreiterung der in der Wickenburggasse vorhandenen Radverkehrsanlage erstellt wurde. Im Zuge jener Studie wurden sechs unterschiedliche Szenarien entwickelt, die einerseits die verkehrlichen Gegebenheiten vor und nach der Fahrstreifenreduktion, andererseits zur Morgen- und Abendspitze sowie zu Mittag abbilden. Ausgehend von diesem Modell wurden iterativ Anpassungen durchgeführt und aus diesen Veränderungen neue Szenarien generiert. Diese resultieren aus dem in Unterabschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschriebenen iterativen Prozess und beruhen auf der Zielsetzung, das Netz bezüglich Kalibrierung der verkehrlichen Kenngrößen schrittweise zu verbessern, aber auch auf der Tatsache, dass während des Arbeitsprozesses, unter anderem auch durch die Rückkopplung mit PC-Crash immer wieder Ungenauigkeiten entdeckt wurden, die für die Konfliktauswertung eine essentielle Rolle spielen. Zur Anwendung kam dabei der Szenarienmanager in VISSIM, der eine übersichtliche Gliederung der einzelnen Arbeitsschritte und Szenarien erlaubt und die Nachvollziehbarkeit einzelner Veränderungen erleichtert.

4.4.1 Versuchsplan

Zur besseren Übersicht über die Modellierungsschritte wurden die Meilensteine der Szenariengenerierung in einem Versuchsplan zusammengefasst. Für die die Untersuchung wurden im Vorfeld relevante Themenbereiche für eine Verkehrssicherheitsuntersuchung festgelegt. Der erste Themenschwerpunkt umfasst das Fahrverhalten, das im Rahmen einer Parameterstudie untersucht wurde. Angeknüpft wurde hierbei an bereits durchgeführte Studien und der Fokus auf die Betrachtung der Folge- und Querverhaltensparameter gelegt. Ergänzend wurden aber auch die Simulationsfrequenz, nicht regelkonformes Verhalten und Fahrverhaltensparameter des Fahrradverkehrs genauer untersucht. Der zweite Bereich thematisiert die Sichtstrahladaptierung. Hierbei wurde der Ansatz gewählt, anhand bereits bekannter Richtwerte aus dem Straßenbau über die Parametrierung von Konfliktflächen und Langsamfahrbereichen ein den Sichtverhältnissen angepasstes Fahrverhalten der Simulationsfahrzeuge zu modellieren. Ähnlich verhält es sich in Bezug auf die Fahrdynamik, die als dritter Schwerpunkt gewählt wurde. Dabei wurde über Langsamfahrbereiche die Geschwindigkeit der VISSIM Fahrzeuge an die durch Erkenntnisse aus der Mechanik gewonnen Grenzwerte angepasst.

Begonnen wurde mit der iterativen Bearbeitung des Ausgangsmodells zur Vorbereitung für die Verkehrssicherheitsuntersuchung. Dieser Prozess führte letztendlich zu vier Basisszenarien, die für den Vergleich mit den aus den sicherheitsrelevanten Themenbereiche entwickelten Unterszenarien herangezogen wurden, welche in Abbildung 25 schematisch dargestellt sind. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Adaptierungsschritte und den jeweiligen Ergebnissen ist den folgenden Abschnitten zu entnehmen. An dieser Stelle soll lediglich die Grundstruktur der Szenariengenerierung dargestellt werden.

Das gewählte Referenzmodell Wickenburggasse wurde mit der Bezeichnung REF V0 als Ausgangsszenario festgelegt. Anhand dieses Modells wurde zunächst die Simulationsfrequenz untersucht und

aufgrund der Reisezeitergebnisse die Wunsch- und Maximalbeschleunigung angepasst. Anhand dem daraus generierten Szenario REF V1 wurde das Netz auf verkehrssicherheitsrelevante Modellgenauigkeiten untersucht und entsprechend angepasst. Betroffen davon war auch die Geometrie, die unter anderem für die Detailuntersuchung von Sichtweite und Fahrdynamik eine wesentliche Voraussetzung darstellt. Diese Veränderungen führten zu Szenario REF V2, das als Grundlage für Parameterstudien zum Folge- und Querverhalten dient. Letztendlich wurde das Netz in Richtung Westen über den Lendplatz in die Keplerstraße erweitert und als Szenario REF V3 definiert. Der Grund dafür lag in dem Anspruch einen geeigneten Knotenpunkt für die Untersuchung der Konflikte zwischen Fahrrad- und motorisierten Individualverkehr zu finden. Anhand dieses Netzes wurden noch weitere Untersuchungen zu dem Thema Fahrradverkehr und nicht regelkonformes Verhalten im Rahmen der Parameterstudie durchgeführt. Für die Analysen der Sichtweitenproblematik und Fahrdynamik kam ebenfalls dieses Szenario zur Anwendung. Zur Übersicht ist in Abbildung 25 die Szenarienstruktur skizziert.

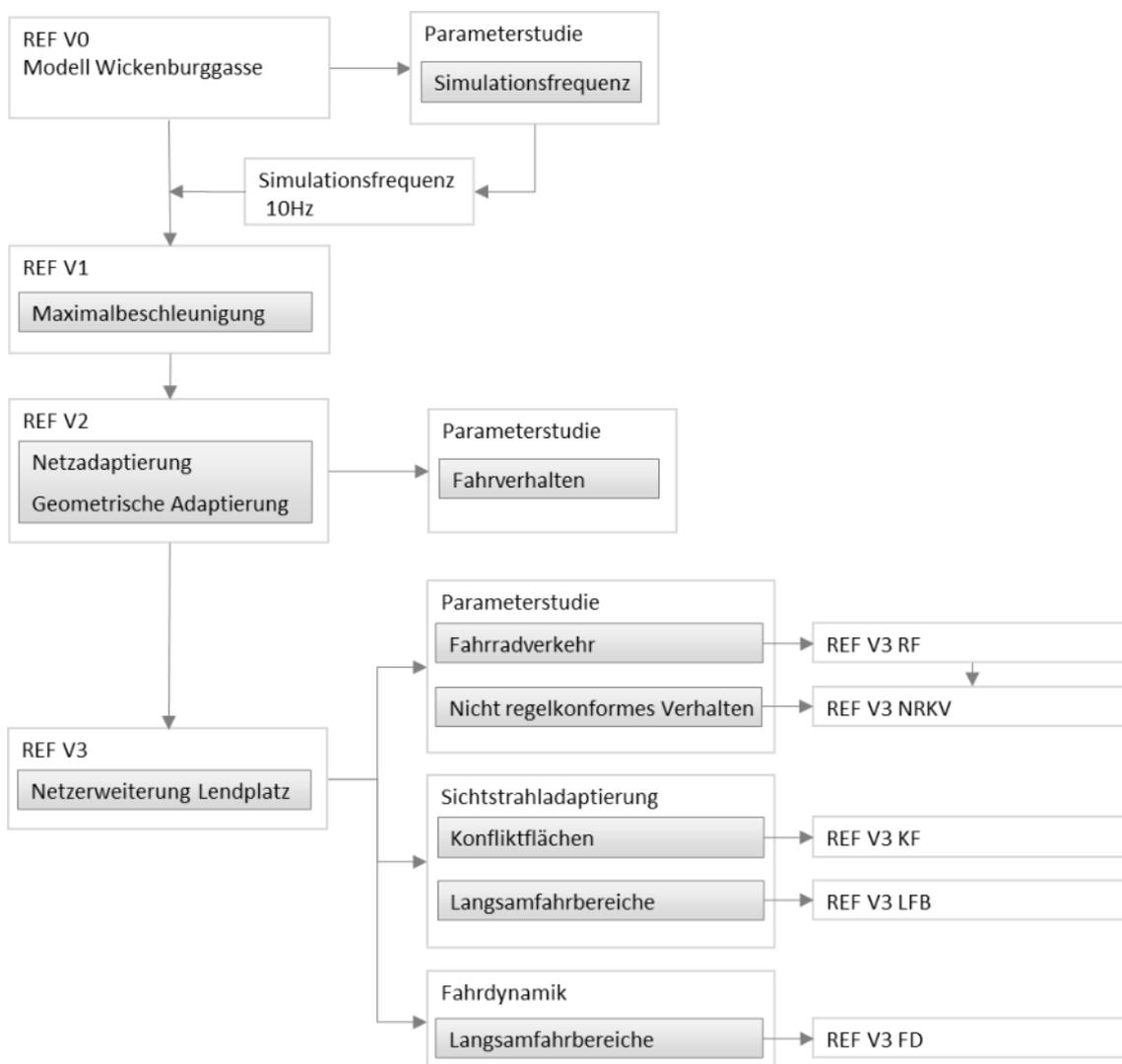


Abbildung 25: Überblick über die Szenarien

4.4.2 Verkehrsmodell Wickenburggasse (REF V0)

Als Ausgangsmodell für diese Masterarbeit wurde das Wickenburggassenmodell vor der Fahrstreifenreduktion zur Morgenspitze gewählt. Das Modell umfasst 265 Streckensegmente und sechs

signalisierte Knotenpunkte. Neben den Modi Pkw, Lkw und Fußgänger ist auch der ÖPNV sowohl in Form von Bus- als auch Straßenbahnverbindungen vertreten. Der motorisierte Individualverkehr verteilt sich ausgehend von neun Zuflüssen auf insgesamt 46 Routen, während der ÖPNV auf 8 ÖV-Linien mit 16 Routen fährt. Die detaillierte Ausführung der eben beschriebenen Parameter sind dem Anhang 8.2 und 8.3 zu entnehmen.



Abbildung 26: Netz Wickenburggasse

Die Ergebnisse des REF V0 bezüglich Verkehrsstärke sind in Abbildung 27 dargestellt, wobei hier die Mittelwerte der fünf Messtage (blau) denen der zehn Simulationsläufe (grün) gegenübergestellt sind. Die Zahlenwerte dazu sind in der unten beigefügten Tabelle für die Messung der ersten und für die Simulation der zweiten Zeile zu entnehmen. Der berechnete GEH-Wert an jedem Querschnitt ist durch die punktuelle Visualisierung dargestellt, wobei die Zahlenwerte in der letzten Zeile der Tabelle zu finden sind. Die graue horizontale Linie im Hintergrund der Grafik stellt den GEH-Grenzwert von 5 dar.

Es zeigt sich, dass an 10 der 15 Querschnitte der GEH-Wert von 5 unterschritten wird und dort somit von einer guten Übereinstimmung ausgegangen werden kann. Die größten Abweichungen sind im Bereich Kaiser-Franz-Josefs-Kai und Keplerbrücke lokalisiert. Am Querschnitt Kaiser-Franz-Josefs-Kai betreffen diese nur die beiden Linksabbiegerfahrstreifen Kaiser_17_3 und Kaiser 17_4 in Richtung Keplerbrücke. Hier ergeben sich GEH-Werte von 12 und 8,9, während die ersten beiden Fahrstreifen diesbezüglich unter 0,5 liegen. Auf der Keplerbrücke in Richtung Lendplatz (Kepler_16) sind jedoch beide Fahrstreifen von deutlichen Abweichungen betroffen und führen zu einem GEH von über 15. Auch am Querschnitt Wicken_18_2 liegt dieser Wert über 5, wenn auch nur geringfügig. Werden die Ergebnisse nicht fahrestreifenfein, sondern streckenfein betrachtet, so stimmen die Belastungen von Messung und Simulation annähernd überein. Dies geht auch aus der unteren Abbildung grafisch hervor, insbesondere bei den Querschnitten Kaiser_17 und Kepler_16. Daraus lässt sich schließen, dass die Diskrepanzen nicht auf Routenentscheidungen, sondern auf die Fahrstreifenwahl der FFE zurückzuführen sind. Da in diesem Status das Netz in Richtung Keplerbrücke endet, wurden diese Ergebnisse zunächst vernachlässigt und erst im Zuge der Modellierung des Szenarios REF V2 angepasst, die in Unterabschnitt 4.4.5 beschrieben ist.

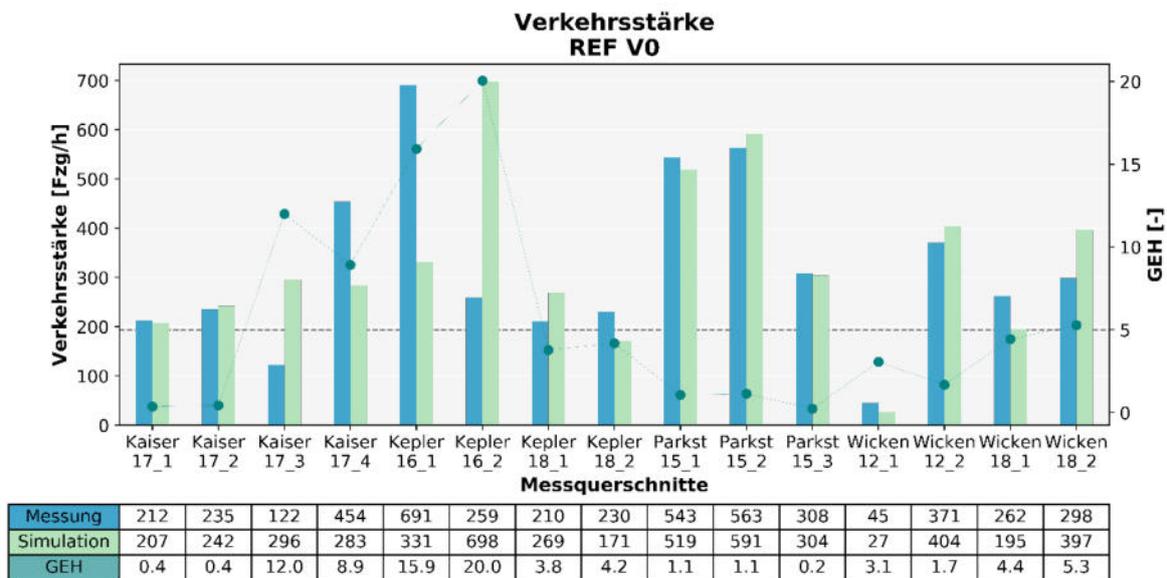


Abbildung 27: REF V0 - Verkehrsstärke

Das Diagramm zur Reisezeit ist wiederum so aufgebaut, dass in blau der Mittelwert der fünf Messungen dem der zehn Simulationsläufe in grün gegenübergestellt ist. Der Wert des Fehlermaßes RMSPE ist mit Punkten gekennzeichnet und dessen Wert ist der letzten Zeile in der Tabelle zu entnehmen. In allen Abschnitten liegen die Simulationswerte deutlich unter jenen der Messungen. Die größten relativen Abweichungen sind bei den beiden in der Wickenburggasse gelegenen Abschnitten (Wicken_Wicken), wo sich ein RMSPE über 25 % ergibt. Da sie allerdings die geringsten absoluten Abweichungen aufweisen, ist die Höhe der relativen Abweichung als Resultat der niedrigen Reisezeitwerte zu sehen. Die größte absolute Abweichung tritt hingegen im Abschnitt Humbo_Kepler auf, fällt aber aufgrund des hohen Reizeitwertes von 110,3 Sekunden prozentuell nicht so stark ins Gewicht. Es handelt sich dabei um den Abschnitt, bei dem in den Messdaten bereits ein Ausreißer eliminiert wurde. Zu beachten ist dabei, dass in diesem Abschnitt drei VLSA liegen und die dort auftretenden Warte- bzw. Stehzeiten ebenfalls einen Einfluss auf die Höhe der Reisezeit haben. Aufgrund der Tatsache, dass in den Abschnitten Wicken_Wicken nur ein signalisierter Knotenpunkt liegt und sich trotzdem große Abweichungen ergeben lässt sich schließen, dass die kinematischen Parameter zu hoch eingestellt sind.

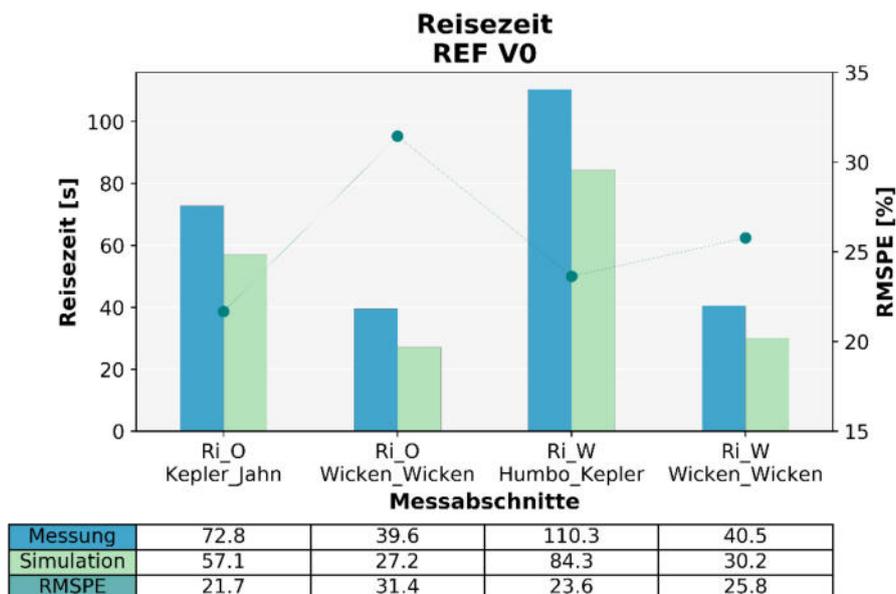


Abbildung 28: REF V0 - Reisezeit

Im gesamten Netz wurden unter Anwendung der Filterbedingungen 3598 Konflikte detektiert. Anhand der Mittelwertbildung über die zehn Simulationsläufe ergeben sich daraus insgesamt 360 Konflikte für die Spitzenstunde. Auffallend ist hierbei, dass die Rear-End-Konflikte maßgebend sind, während Crossing und Lane Change Konflikte zusammen nicht ganz 15 % der Konflikte ausmachen.

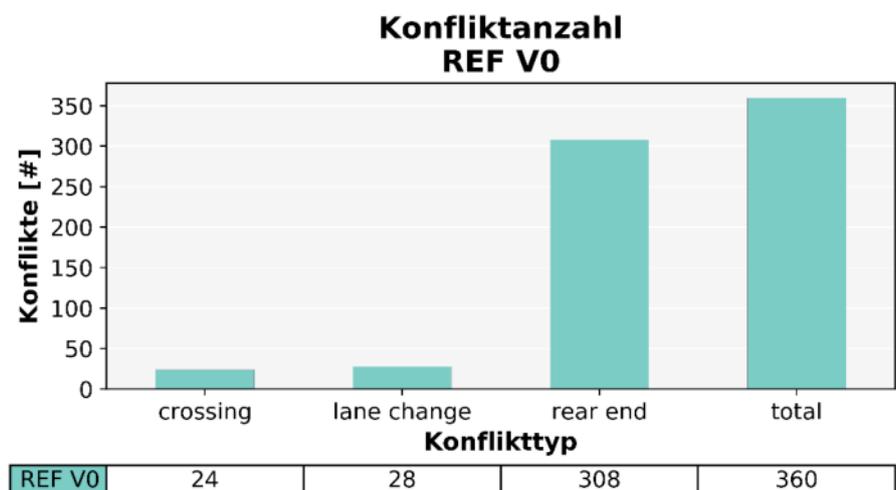


Abbildung 29: REF V0 - Konfliktanzahl

Für die Auswertung der Konfliktkenngrößen werden die Parameter untersucht, die beiden Fahrzeugen gemeinsam zugeschrieben werden können und die Zahlenwerte eine Interpretation im Sinne einer deskriptiven Datenanalyse zulassen. Eine vollständige Abbildung dieser Konfliktparameter ist dem Anhang 8.1.4 zu entnehmen, während an dieser Stelle vorrangig auf TTC und PET detailliert eingegangen wird.

Der Interquartilsabstand von TTC befindet sich zwischen 1,1 und 1,4 Sekunden und ist folglich im höheren Bereich angesiedelt. Dies bestätigt sich durch einen Mittelwert und Median über 1 in Kombination mit einer Standardabweichung von 0,4 Sekunden. Nachdem Konflikte mit einem TTC-Wert von 0 aufgrund der Filterung nicht mehr hier enthalten sind, liegt das Minimum bei 0,1 Sekunden,

während Werte unter 0,7 Sekunden bei TTC nur noch in Form von Ausreißern vertreten sind. Anhand dieser Ergebnisse ist ersichtlich, dass es sich vorwiegend um leichte Konflikte handelt. Bei PET hingegen ist der Interquartilsabstand zwischen den definierten Grenzwerten mittig angesiedelt. Auch der Mittelwert von 2,6 und die Standardabweichung von 1,3 spiegeln diese Ergebnisse wieder. Hier wird durchaus auch ein PET Wert von Null erreicht, was darauf hinweist, dass der Konfliktbereich gleichzeitig von mehreren Fahrzeugen überlagert wird. Interessant ist hierbei, dass diese Konflikte kein TTC von Null aufweisen, da diese bereits durch die in Unterabschnitt 4.2.4 angeführten Filterbedingungen ausgeschlossen wurden. Die Rundungen auf eine Kommastelle sind direkt auf die Ergebnisse aus SSAM zurückzuführen.

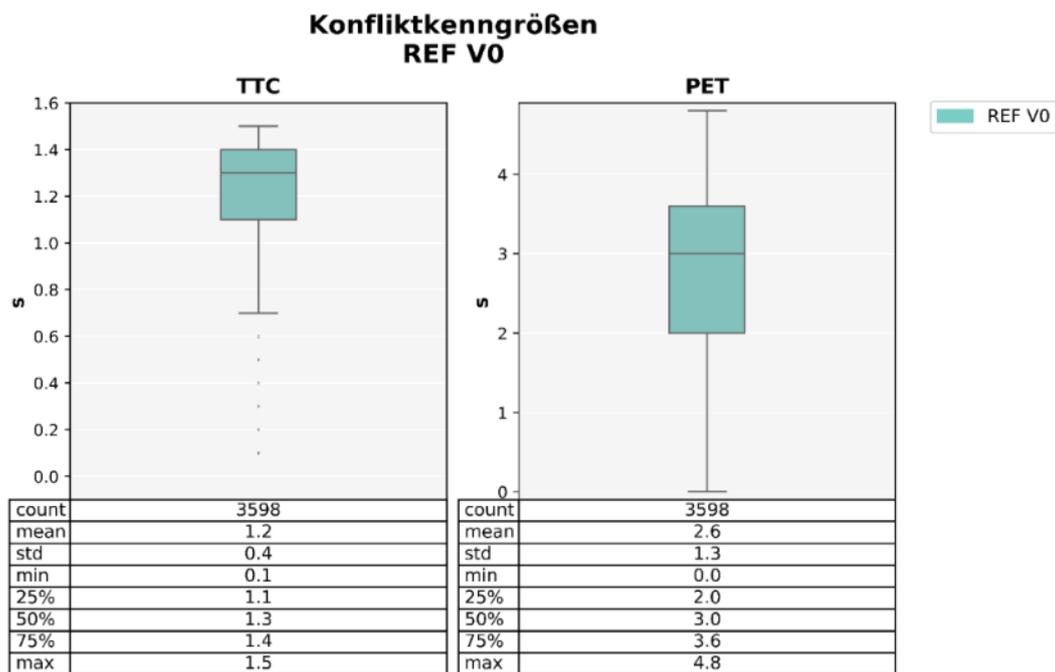


Abbildung 30: REF V0 - TTC und PET

In Abbildung 31 ist die Verteilung der Konflikte im Netz, klassifiziert nach TTC, ersichtlich. Am meisten Konflikte ergeben sich in den Wartebereichen der lichtsignalgesteuerten Knotenpunkte. Auffallend ist der hohe Anteil an Konflikten mit einem TTC unter 0,5 Sekunden, die nicht nur an den Knoten, sondern auch auf den Strecken auftreten.



Abbildung 31: REF V0 - Konflikte im Netz

4.4.3 Simulationsfrequenz (REF V0)

Die Simulationsfrequenz ist ein grundlegender Parameter, um Ergebnisse zu beeinflussen, insbesondere im Zuge einer Konfliktanalyse. Sie gibt die Anzahl der Berechnungsschritte pro Sekunde in Hertz (Hz) vor und damit wie oft in jedem Zeitschritt die Position der Fahrzeuge eruiert wird. PTV (2016) sieht für die abschließende Produktion von Simulationsergebnissen eine Frequenz von 5 bis 10 Hz vor, da in diesem Wertebereich bereits eine realistische Darstellung ermöglicht wird. Niedrigere Frequenzen führen hingegen zu ruckartigen Bewegungen der Fahrzeuge und eignen sich dadurch nicht zur Generierung von validen abschließenden Simulationsergebnissen. Allerdings begünstigen Frequenzen unter 5 Hz eine höhere Simulationsgeschwindigkeit und eignen sich somit für Aufbauphase des Modells. Frequenzen zwischen 10 und 20 Hz führen zu einer sehr flüssigen Darstellung und sind somit für qualitativ hochwertige Simulationsanimationen geeignet. (PTV, 2016) Da in weiterer Folge die ermittelte optimale Simulationsfrequenz als Grundlage für die weiteren Analysen dienen soll, wurde die Simulationsfrequenz zu Beginn untersucht. Der Defaultwert in VISSIM beträgt 10 Hz, während der Referenzfall mit einer Frequenz von 5 Hz simuliert wurde. Um die gesamte Spannweite von 1 bis zum Maximalwert von 20 Hz abzubilden wurde die Simulation mit 1, 5, 10, 15 und 20 Hz durchgeführt.

Die Verkehrsstärke variiert mit unterschiedlichen Simulationsfrequenzen nur minimal und resultiert in einem annähernd gleichen GEH-Wert in allen Parametereinstellungen. Allerdings ist zu beobachten, dass sich mit einer Frequenz von 1 Hz die Ergebnisse von den anderen abheben.

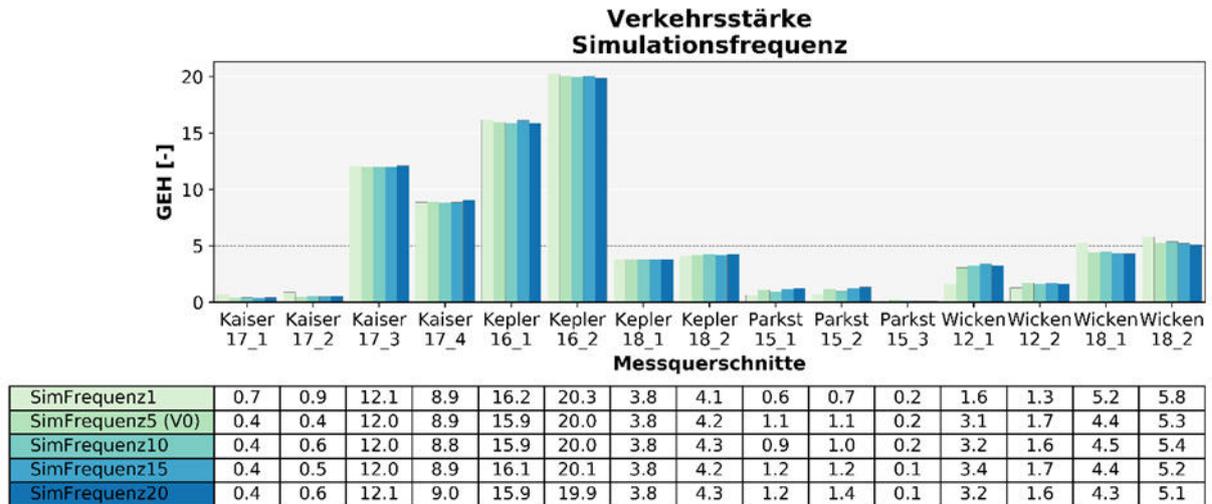


Abbildung 32: REF V0 Simulationsfrequenz - Vergleich Verkehrsstärke

Auch die Reisezeit bleibt weitgehend unverändert durch die Simulationsfrequenz. Es zeigen sich auch keine durchgängigen Ergebnisse über alle Messabschnitte, sondern ein sehr heterogenes Bild. Diese Ergebnisse decken sich mit denen von Park und Qi (2005), die ebenfalls die Simulationsfrequenz bezüglich Reisezeit untersucht haben und keinen signifikanten Einfluss feststellen konnten.

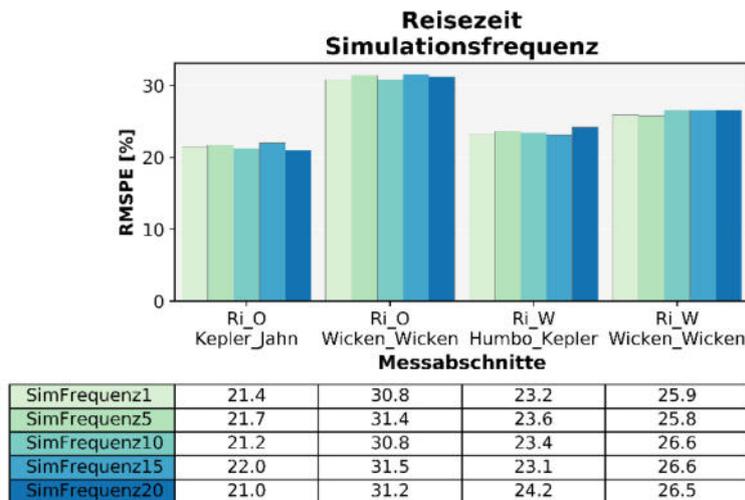


Abbildung 33: REF V0 Simulationsfrequenz - Vergleich Reisezeit

Deutlichere Ergebnisse sind jedoch bezüglich der Konflikte zu erkennen. Hierbei ist ersichtlich, dass bei niedrigeren Frequenzen mehr Konflikte generiert werden. Vor allen bei Crossing- und Lane-Change-Konflikten reduziert sich die Anzahl zwischen 1 und 5 Hz relativ gesehen massiv. Insgesamt ergibt sich eine Steigerung von 160 %. Begründet kann dies dadurch werden, dass die Positionen der Fahrzeuge sich bei größeren Zeitschritten gravierender verändern und nicht mehr rechtzeitig auf Umgebungs-fahrzeuge reagieren können. Allerdings widerspricht dieser Aussage die Tatsache, dass in den höheren Frequenzbereichen die Anzahl wieder leicht zunimmt. Bei 10 Hz, die auch dem VISSIM Defaultwert entspricht, werden am wenigsten Konflikt generiert. So ergeben sich hier Abweichungen von -41 % im Vergleich zum REF V0. Hingegen verringern sich diese auf -32 % bei 15 Hz und auf -23 % bei 20 Hz.

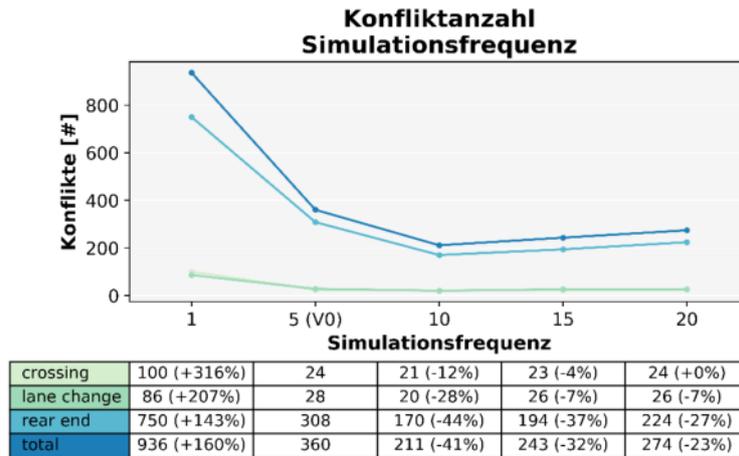


Abbildung 34: REF V0 Simulationsfrequenz - Vergleich Konfliktanzahl

Bei den Konfliktgrößen TTC und PET lässt sich allgemein der Trend beobachten, dass die Grenzen der Interquartilsabstände sich zumindest über dem Median ab 10 Hz angleichen, wobei die Werte des ersten Quartils sich mit zunehmender Frequenz erhöhen. Bei TTC fällt auf, dass bei 10 Hz auch Werte unter 1 noch in den Interquartilsbereich fallen und durch dessen Breite auch das untere Whisker deutlich niedriger liegt. Wird berücksichtigt, dass die Anzahl sich deutlich reduziert, so lässt sich daraus schließen, dass niedrigere TTC-Werte und folglich schwerere Konflikte hier deutlich mehr ins Gewicht fallen. Auch PET zeigt den breitesten Interquartilsabstand bei 10 Hz und hebt sich bezüglich des ersten Quartils deutlich von niedrigeren Frequenzen ab. Ab diesem Wert unterscheiden sich die Quartile und der Mittelwert nur noch geringfügig voneinander. Auffallend ist auch hier wieder, dass bei höherer Frequenz niedrige PET-Werte im Verhältnis stärker vertreten sind.

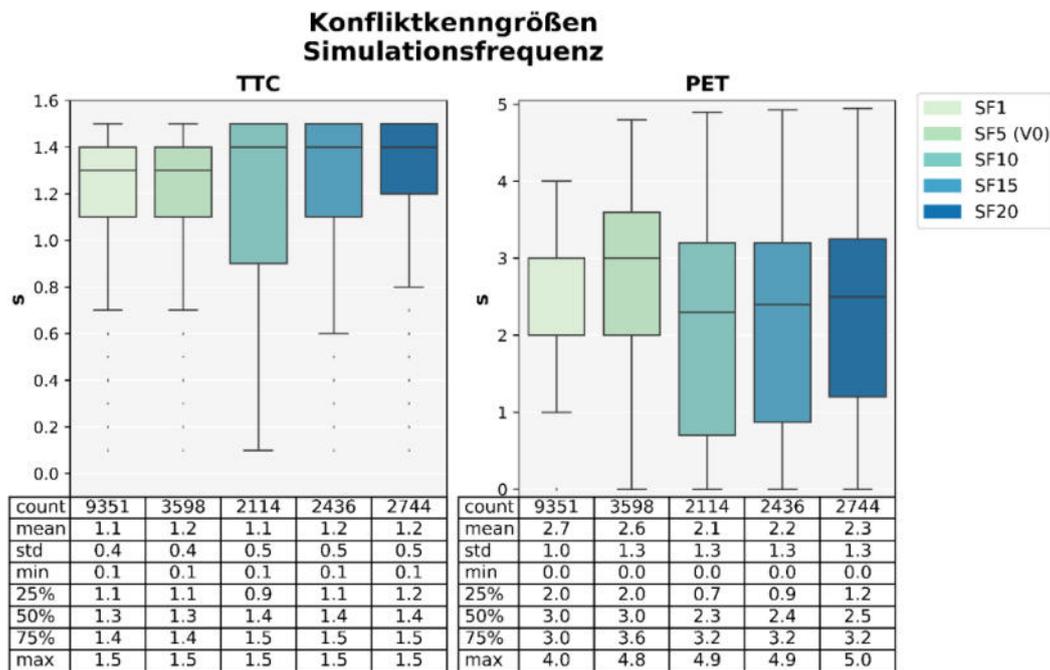


Abbildung 35: REF V0 Simulationsfrequenz - Vergleich TTC und PET

Aus diesen Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Simulationsfrequenz auf die verkehrlichen Kenngrößen nur minimalen Einfluss hat. Hingegen ist sie ein entscheidender Parameter für die Generierung von Konflikten und für diesbezügliche Studien unbedingt zu berücksichtigen. Für das weitere Vorgehen in dieser Arbeit wurde die Simulationsfrequenz von 10 Hz gewählt, da sich ab diesem Wert die Ergebnisse angleichen.

4.4.4 Wunsch- und Maximalbeschleunigung (REF V1)

Da die Reisezeit in der Simulation die gemessenen Werte noch weit unterschreitet, wurde versucht, diese über Veränderungen der Wunsch- und Maximalbeschleunigung anzupassen. Zur Anwendung kamen dabei Ergebnisse aus dem Projekt GAVE (Hirschmann et al., 2009), im Rahmen dessen unter anderem das Beschleunigungsverhalten kalibriert wurde. Dabei haben sich Wunsch- und Maximalbeschleunigungswerte ergeben, die von den Defaulteinstellungen in VISSIM deutlich abweichen bzw. darunterliegen. Durch geringere Beschleunigungswerte verringert sich auch die Geschwindigkeit und in Folge die Reisezeit. Ein Vergleich der Wunschbeschleunigungsverteilungen des PKW ist in Abbildung 36 ersichtlich.

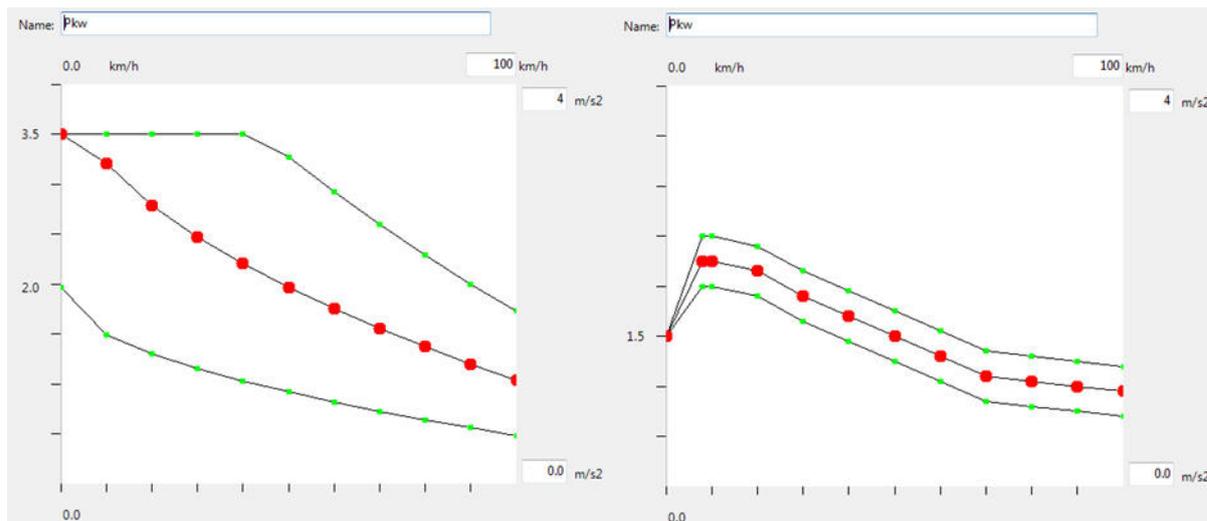


Abbildung 36: Wunschbeschleunigung Default und GAVE

Ausgehend von der gewählten Simulationsfrequenz von 10 Hz werden hier die beiden Szenarien vor und nach Implementierung der neuen Beschleunigungswerte gegenübergestellt. In Abbildung 37 zeigt sich, dass die Veränderungen der Maximal- und Wunschbeschleunigung kaum Einfluss auf das Ergebnis der Verkehrsstärke haben. Lediglich in der Wickenburggasse und am Kaiser-Franz-Josef-Kai sind minimale Verbesserungen zu beobachten. So ergibt sich bei Kaiser_17_1 und Kaiser_17_2 eine Reduktion des GEH-Wertes um 0,2. Bei Wicken_18 erreicht der zweite Fahrstreifen nun genau den Grenzwert von 5, während der erste Fahrstreifen einen um 0,7 geringeren GEH-Wert aufweist. Diejenigen Werte, die bereits über dem gewünschten Grenzwert liegen, zeigen jedoch keine Veränderungen oder sogar Verschlechterungen, wie im Fall von Kaiser 17_4, dessen GEH-Wert um 0,1 gestiegen ist.

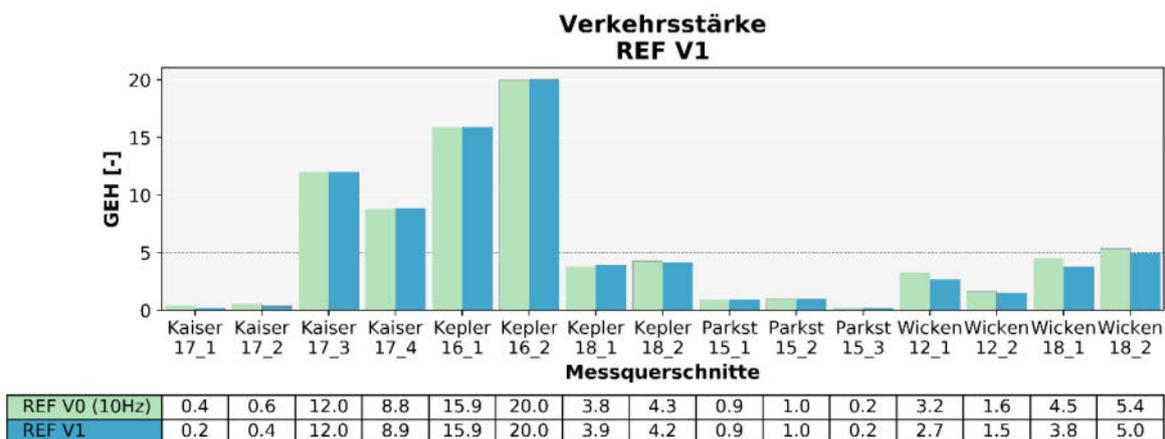


Abbildung 37: REF V1 - Vergleich Verkehrsstärke

Die Ergebnisse in Abbildung 38 bestätigen, dass die angepassten Beschleunigungswerte sich positiv auf die Reisezeit auswirken. Allerdings ist auch ersichtlich, dass die Auswirkungen diesbezüglich nur sehr gering ausfallen. Ein Vergleich der absoluten Werte aus Abbildung 28 und Anhang 8.1.2 zeigt, dass teilweise nicht einmal eine ganze Sekunde gewonnen werden konnte. Interessant ist, dass innerhalb der Wickenburggasse in Richtung Osten mit 30,1 % nur eine Verbesserung um 0,7 Prozentpunkte erreicht werden konnte, während sich in Richtung Westen die Abweichung um 2,3 verbessert hat. Die

stärkste Veränderung ist am Abschnitt Humbo_Kepler eingetreten, wobei hier wieder die drei signalisierten Knotenpunkte zu berücksichtigen sind. Da es an diesen vermehrt zu Halten kommt und die Fahrzeuge ihre Wunschgeschwindigkeit anstreben, können mehr Beschleunigungsvorgänge und größere Beschleunigungswerte auftreten als im fahrenden Zustand. Werden diese durch die eingestellte Maximalbeschleunigung begrenzt, so hat diese Parametereinstellung folglich mehr Einfluss auf Reisezeitabschnitte, die über mehr Knotenpunkte bzw. dadurch initiierte Halte verfügen. Dieser Überlegung widerspricht allerdings das Ergebnis des Abschnittes Kepler_Jahn, da hier die Abweichung nur auf 19,9 reduziert werden kann.

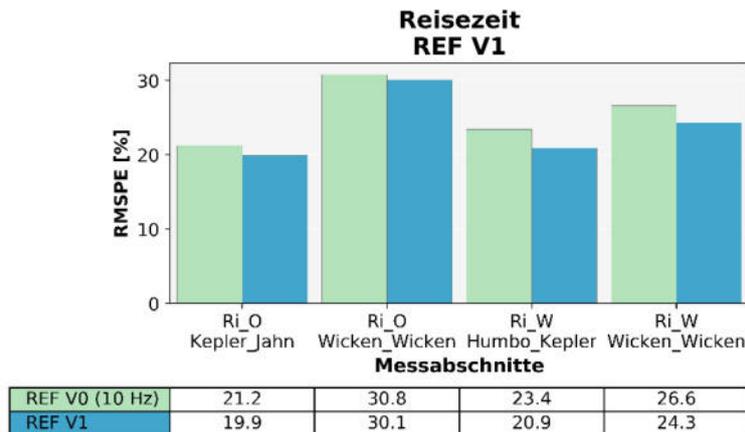


Abbildung 38: REF V1 - Vergleich Reisezeit

Trotz dieser geringen Auswirkungen wurden die angepassten Beschleunigungswerte beibehalten und in Kombination mit der Simulationsfrequenz von 10 Hz als neuer Referenzfall REF V1 übernommen.

Durch die geringeren Beschleunigungen ist es nachvollziehbar, dass die Konflikte, insbesondere die Rear-End Konflikte um 8 % sinken. Eine Begründung für die im Gegenzug dazu um 9 % gestiegenen Crossing-Konflikte könnte sein, dass Simulationsfahrzeuge beim Ausbiegen nicht mehr so schnell beschleunigen und somit nicht mehr rechtzeitig den Konfliktbereich räumen können.

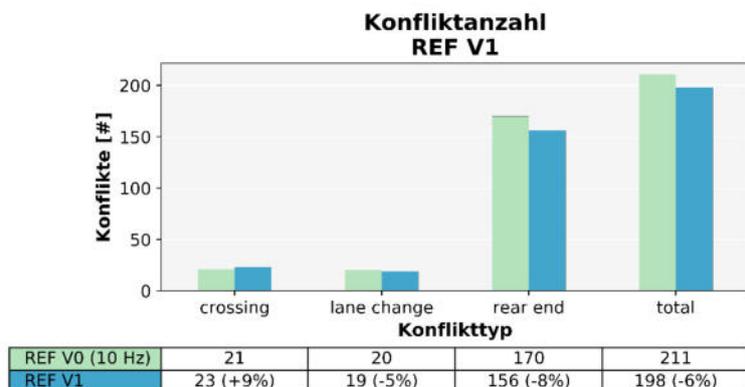


Abbildung 39: REF V1 - Vergleich Konfliktanzahl

Die Analyse der Konfliktparameter zeigt, dass TTC und PET annähernd unverändert bleiben. Lediglich das erste Quartil liegt im Szenario REF V1 bei beiden Parametern um 0,1 Sekunden niedriger. Somit tritt trotz Reduktion, die gleiche Verteilung des Schweregrades auf und ist folglich durch die Veränderung der Wunsch- und Maximalbeschleunigung weitgehend unbeeinflusst.

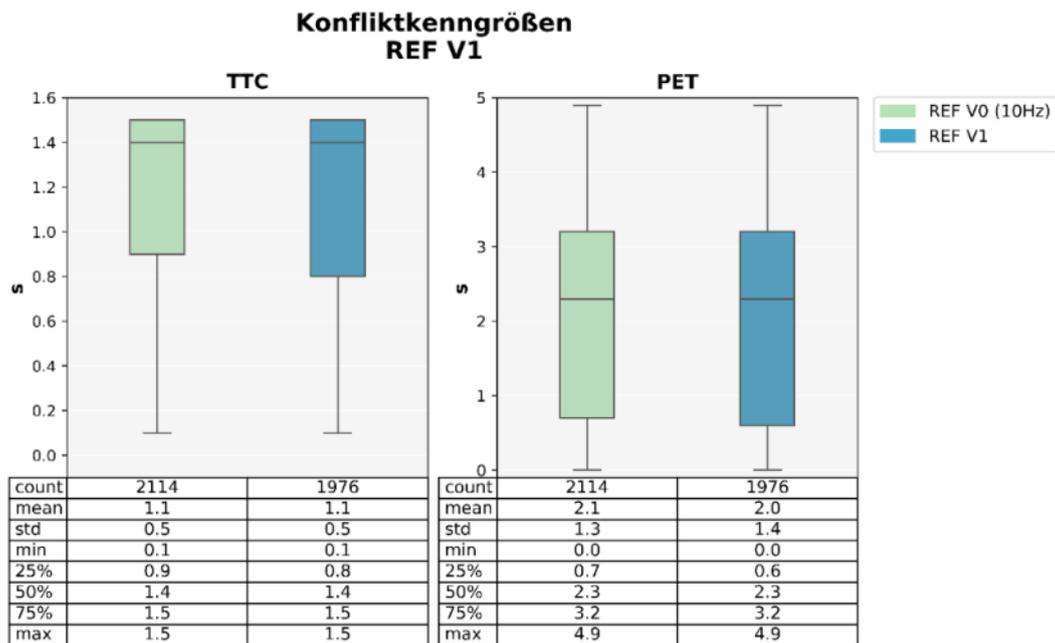


Abbildung 40: REF V1 - Vergleich TTC und PET

4.4.5 Netzanpassungen (REF V2)

Im Zuge der ersten Untersuchungen und unter anderem auch durch die Detailanalysen in PC-Crash hat sich herausgestellt, dass für weitere Detailuntersuchungen eine Überarbeitung des Modells notwendig ist. Auf diese Anpassungen wird nun in den nächsten Unterabschnitten eingegangen, wobei auf Grundlagen der Modellierung in VISSIM nur am Rande eingegangen wird. Ausführungen dazu sind dem VISSIM 9 Handbuch (PTV, 2016) zu entnehmen. Die Veränderungen betreffen einzelne Netzelemente aber auch die Geometrie des gesamten Netzes.

Für die Anpassungen der Elemente des Netzes wurde dieses zunächst auf Problemstellen untersucht und daraufhin Veränderungen bezüglich VLSA, Vorfahrtsregelungen und Routenentscheidungen vorgenommen.

VLSA

An dieser Stelle werden für das Modell Wickenburggasse und diese Arbeit wesentlichen Methoden zur VLSA nur verkürzt vorgestellt. Für eine ausführliche Erläuterung der Grundlagen und Begrifflichkeit zur Gestaltung der VLSA allgemein und in VISSIM wird hier verzichtet und auf PTV (2016) verwiesen. In VISSIM können festzeitgesteuerte Lichtsignalanlagen über den LSA-Editor VISSIG implementiert werden, mit dem Signalgruppen und -programme sowie Phasen definiert werden können. Für verkehrsabhängige Steuerungen kommt in dieser Arbeit vorrangig das Zusatzmodul VAP (Verkehrsabhängige Programmierung) zusammen mit dem Flussdiagrammeditor VisVAP zur Anwendung. Die erste Anpassung betrifft die VLSA 503, die am Knotenpunkt Bergmannsgasse/Humboldtstraße angesiedelt ist. Es stellte sich im Zuge der ersten Simulationen heraus, dass die Grünphasen der sich kreuzenden Ströme zeitgleich stattfanden, da sie der gleichen Signalgruppe 503_2 zugeordnet waren.



Abbildung 41: Signalgruppen der VLSA 503 vor Bearbeitung

Die Analyse des Morgenspitzenprogrammes zeigte außerdem, dass die beiden Signalgruppen 503-1 und 503-2 den gleichen Namen K12 besitzen und somit die falsche Zuordnung begünstigt haben. Anhand der aus der ursprünglichen Planung entnommenen Signalprogramm der Morgenspitze (Abbildung 43) sowie dem Knotenübersichtsplan (Abbildung 42) wurde der Strom in der Bergmannsgasse K13 benannt und der Signalgruppe 503-1 zugeordnet.

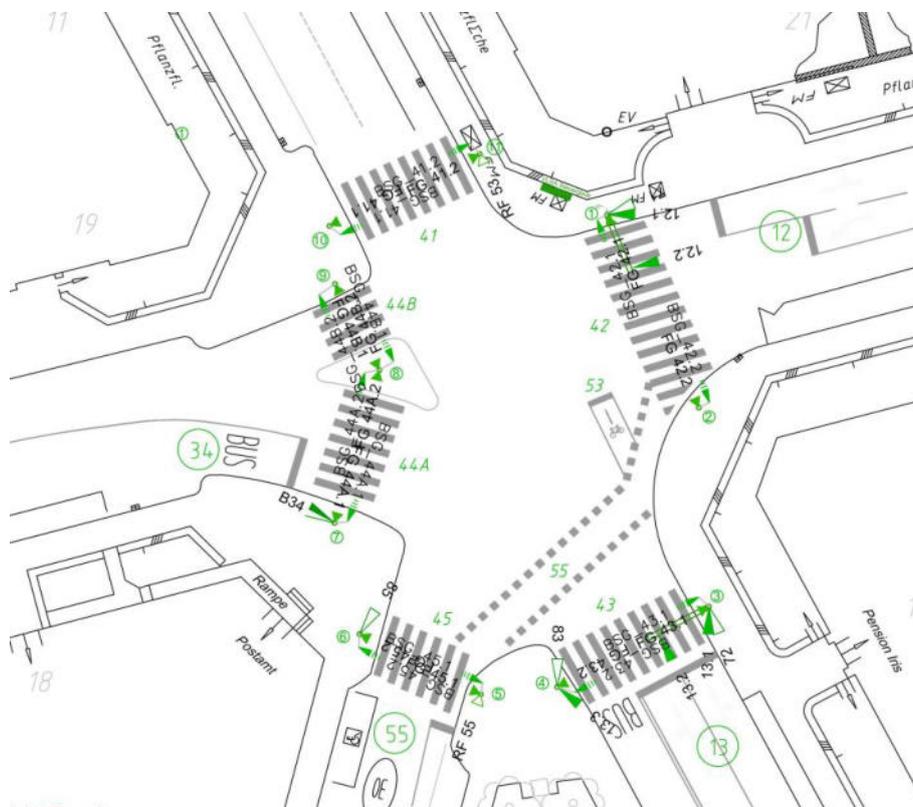


Abbildung 42: Übersichtsplan VLSA 503 (ibv Fallast, 2015)

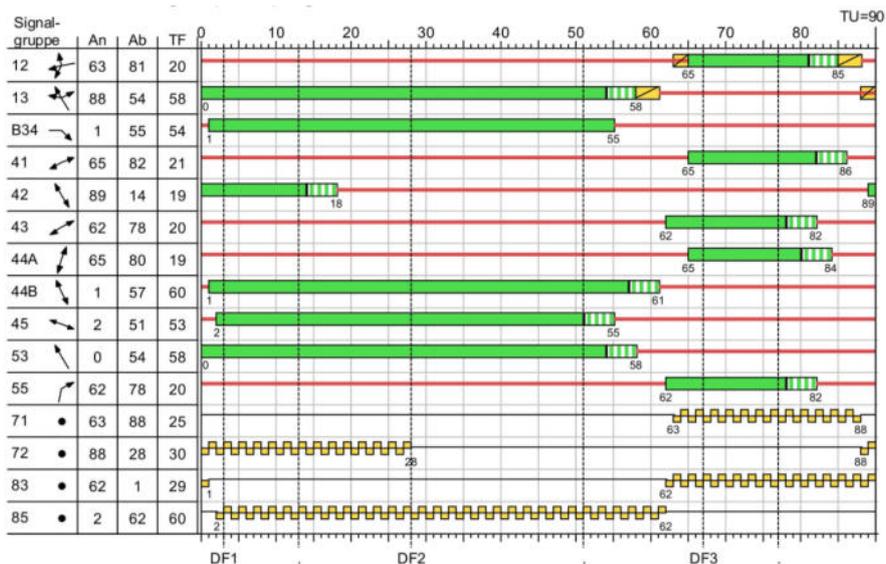


Abbildung 43: Signalprogramm (ibv Fallast, 2015)

Einen weiteren Konfliktpunkt bezüglich VLSA wurde am Geidorfplatz, der mit einer verkehrsabhängigen Logik ausgestattet ist, bearbeitet. Hier waren die Zwischenzeiten von Signalgruppe 504-2 auf Signalgruppe 504-6 insbesondere bei den Programmen 1 und 3 zu kurz angelegt, sodass immer wieder Fahrzeuge von der Glacisstraße den Knoten nicht rechtzeitig passieren konnten. Aus der Überlegung heraus, dass die Signalgruppe 504-2 sich an den Ausläufern des Netzes befindet und dortige Veränderungen der Gründauer sich nicht maßgeblich auf den Verkehrsfluss im Kernnetz auswirken, wurde sie an dieser Stelle in VisVAP in den Programmen 1 und 3 um 2 Sekunden reduziert, wodurch Zwischenzeiten von 5 Sekunden erreicht werden konnten.

Tabelle 7: Gründauern VLSA 504 vor und nach Bearbeitung

Programmnummer	Signalgruppe	Grünphase vor Adaptierung			Grünphase nach Adaptierung		
		Start	Ende	Zwischenzeit	Start	Ende	Zwischenzeit
1	504 - 2	1	31	3	1	29	5
	504 - 5	34	52		34	52	
3	504 - 2	5	34	3	5	32	5
	504 - 5	37	55		37	55	

Konfliktflächen

Konfliktflächen dienen zur Modellierung der Vorrangregeln und werden zwar von VISSIM detektiert, allerdings ohne Einstellungen der Vorfahrtsregelung (passiv) mit der Konsequenz, dass die Fahrzeuge ihrer Trajektorie ohne Rücksicht auf andere Fahrzeuge folgen und dass eine hohe Anzahl an nicht realen Konflikten generiert wird. Einstellungen können zugunsten einer Strecke getroffen werden oder auf unbestimmt gesetzt werden, so dass auf beiden Strecken die Fahrzeuge sich aufeinander abstimmen. Im ursprünglichen Netz waren keine Einstellungen bezüglich Konfliktflächen durchgeführt worden, was durchaus Auswirkungen auf die Ergebnisse der Konflikte hat. Allerdings tritt bei dieser

Art von Konflikten häufig ein TTC von 0 auf und hat damit zur Folge, dass der Großteil dieser Konflikte aufgrund der Filterbedingungen in Unterabschnitt 4.2.4 aus dem Ergebnis fallen. Somit wurden im gesamten Netz die Konfliktflächen so angepasst, dass sie den realen Bedingungen annähernd entsprechen, wobei versucht wurde, Redundanz zu vermeiden. So wurden bei signalgeregelten Knoten nur Konfliktflächen der bedingt verträglichen Ströme eingestellt, aber nicht der Ströme, die aufgrund der VLSA ohnehin nicht aufeinandertreffen.

Querverkehrsstörungen

Querverkehrsstörungen dienen ebenfalls zur Definition von Vorfahrtsregeln, können aber flexibler gestaltet werden als Konfliktflächen. So nutzen die Fahrzeuge bei einem nur mit Konfliktflächen modellierten Knoten, jede mögliche Zeit- und Weglücke, um diesen Punkt trotzdem zu passieren, während über die Querverkehrsstörungen die Simulationsfahrzeuge unter bestimmten Bedingungen zum dauerhaften Halten gezwungen werden können. Definiert wird dabei ein wartepflichtiger Strom und ein oder mehrere störende/r Querschnitt/e. Außerdem können Zeit- und Weglückenabstände sowie Maximalgeschwindigkeiten eingestellt werden.

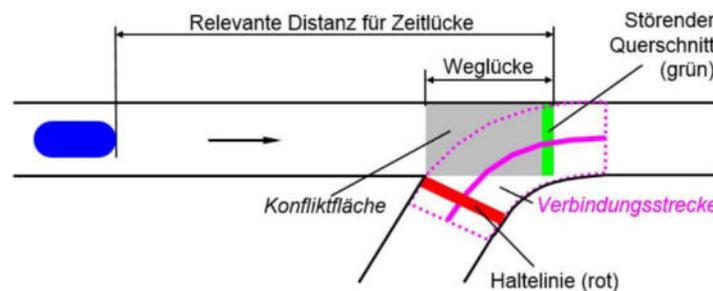


Abbildung 44: Darstellung der Querverkehrsstörung (PTV, 2016)

In diesem Modell wurden Querverkehrsstörungen eingesetzt, um Knotenpunkte zu modellieren, die nicht allein über Konfliktflächen und VLSA geregelt werden konnten. Dies betrifft zunächst den Knoten Keplerbrücke/Kaiser-Franz-Josef-Kai, bei dem durch das zähe Abfließen des Verkehrs am Knoten Körösisstraße/Wickenburggasse (VLSA 501-4 und 501-5) sich ein Rückstau in Richtung Keplerbrücke bildete und der Verkehr aus dem Kaiser-Franz-Josef-Kai blockiert wurde.

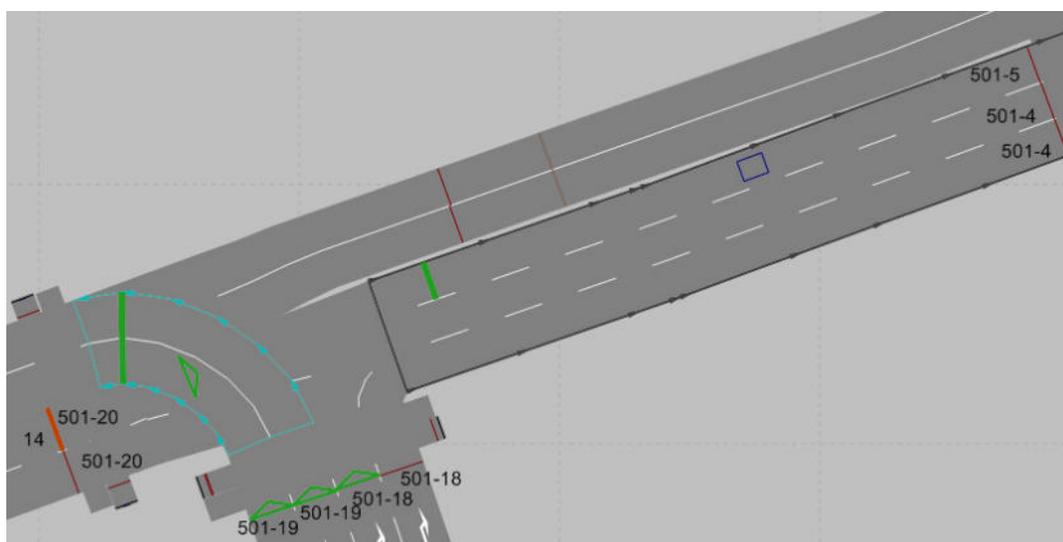


Abbildung 45: Querverkehrsstörung 14

Um dieses Problem zu beheben wurde die Querverkehrsstörung 14 mit zwei störenden Querschnitten modelliert, wobei der erste stromabwärts in der gleichen Fahrtrichtung liegt. Damit wird verhindert, dass die Fahrzeuge im Falle eines Rückstaus an 501-4/501-5 den Signalgeber der Gruppe 501-20 passieren und den Verkehr vom Kaiser-Franz-Josef-Kai in der nächsten Grünphase blockieren. Da in diesem Fall die Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit reduzieren, wurde als Maximalgeschwindigkeit 10 km/h angegeben. Die Mindestweglücke wurde mit 0 Sekunden festgesetzt, da sonst die Fahrzeuge kurz vor der Signalgruppe 501-20 abbremsen und kein fließender Verkehr gewährleistet ist. Der zweite störende Querschnitt betrifft den kreuzenden Strom ausgehend vom Kaiser-Franz-Josef-Kai für den Fall, dass von dort Fahrzeuge am Ende der Grünphase den Signalgeber noch passieren, aber die Überquerung des Knotens sich aufgrund von stockendem Verkehr nicht bis zum Erreichen der Grünphase der Gruppe 501-20 ausgeht. Hier ist keine Maximalgeschwindigkeit eingestellt, da es nur um eine freie Konfliktfläche geht. Wesentlich war dabei auch, dass die Haltelinie dabei vor den Signalgeber gesetzt wurde, damit die Fahrzeuge, falls sie es nicht mehr rechtzeitig den Knoten passieren können, durch das Rotsignal zum Halten gezwungen werden.

Tabelle 8: Querverkehrsstörung 14

Nr.	Strecke/Fahstreifen	Mindestzeitlücke [s]	Mindestweglücke [m]	Maximalgeschwindigkeit [km/h]
14	32/3	0	20	10
14	10055	3	20	180 (default)

Ein weiterer Knotenpunkt, bei dem mit Querverkehrsstörungen gearbeitet wurde, liegt am Geidorfplatz. Fahrzeuge aus der Glacisstraße in Richtung Bergmannsgasse konnten den großen Konfliktbereich dieses Knotenpunktes teilweise nicht mehr rechtzeitig überfahren. Da am Geidorfplatz sehr viele Strecken aufeinandertreffen und dadurch sehr viele störende Querschnitte vorhanden sind, hat sich hier ein anderer Modellierungsweg für die Querverkehrsstörung als effizient erwiesen. Zunächst wurde für den störenden Querschnitt Sondereinstellungen getroffen, sodass diese nur für den Fall gilt, dass die Signalgruppe 504-2 das Signalbild Rot erhält. Außerdem wurde der störende Querschnitt stromaufwärts vor den Signalgeber der Signalgruppe 504-2 platziert und die Maximalgeschwindigkeit mit 5 km/h angegeben. Mit diesen Einstellungen wird erreicht, dass Fahrzeuge aus der Glacisstraße, die gerade noch den Signalgeber der Gruppe 504-2 passieren, von der Querverkehrsstörung angehalten werden. Sie können erst dann wieder weiterfahren, wenn der Strom die nächste Grünphase bekommt und die Geschwindigkeit der wartenden Fahrzeuge größer als 5 km/h ist, d.h. der Strom sich wieder im fließenden Zustand befindet.

Tabelle 9: Querverkehrsstörung 17

Nr.	Strecke/Fahstreifen	Mindestzeitlücke [s]	Mindestweglücke [m]	Maximalgeschwindigkeit [km/h]
17	7	5	10	5



Abbildung 46: Querverkehrsstörung 17

Statische Fahrzeugrouten

Über die statischen Fahrzeugrouten lässt sich definieren, entlang welcher Strecken der Verkehr geführt wird. Um diese zu definieren, wird zunächst ein Startquerschnitt auf die Strecke gelegt und von diesem aus die jeweiligen Routen geführt und deren Anteile der über den Querschnitt fahrenden Fahrzeuge definiert. Im Zuge der Netzanpassungen wurden Routen verändert, wenn es aufgrund geometrischer Veränderungen notwendig war und zur Beeinflussung der Fahrstreifenwahl, um bessere Querschnittswerte zu erzielen, so beispielsweise am Querschnitt Kepler_16. Da hier alle statischen Routen auf der Strecke 12 enden, wird es den VISSIM Fahrzeugen überlassen, welchen Fahrstreifen sie wählen. In der Realität führt diese Strecke aber weiter in Richtung Lendplatz und die dort vorhandenen Abbiegerelationen wirken sich bis zur Keplerbrücke aus. Um diese Beeinflussung zu simulieren, wurden zwei zusätzliche einstreifige Strecken angelegt und mit dem jeweiligen Fahrstreifen gekoppelt. Da der Querschnitt Kepler_16_1 über 70 % des gesamten Verkehrs auf der Keplerbrücke in Richtung Westen hat, wurden alle Routen bis auf eine mit der Strecke 131 verbunden. Lediglich die Fahrzeugroute 2-5 wurde auf die Strecke 142 geführt, um die Fahrstreifenwahl am Kaiser-Franz-Josef-Kai nicht negativ zu beeinflussen. Abbildung 47 zeigt die statischen Fahrzeugrouten vor und nach der Adaptierung.

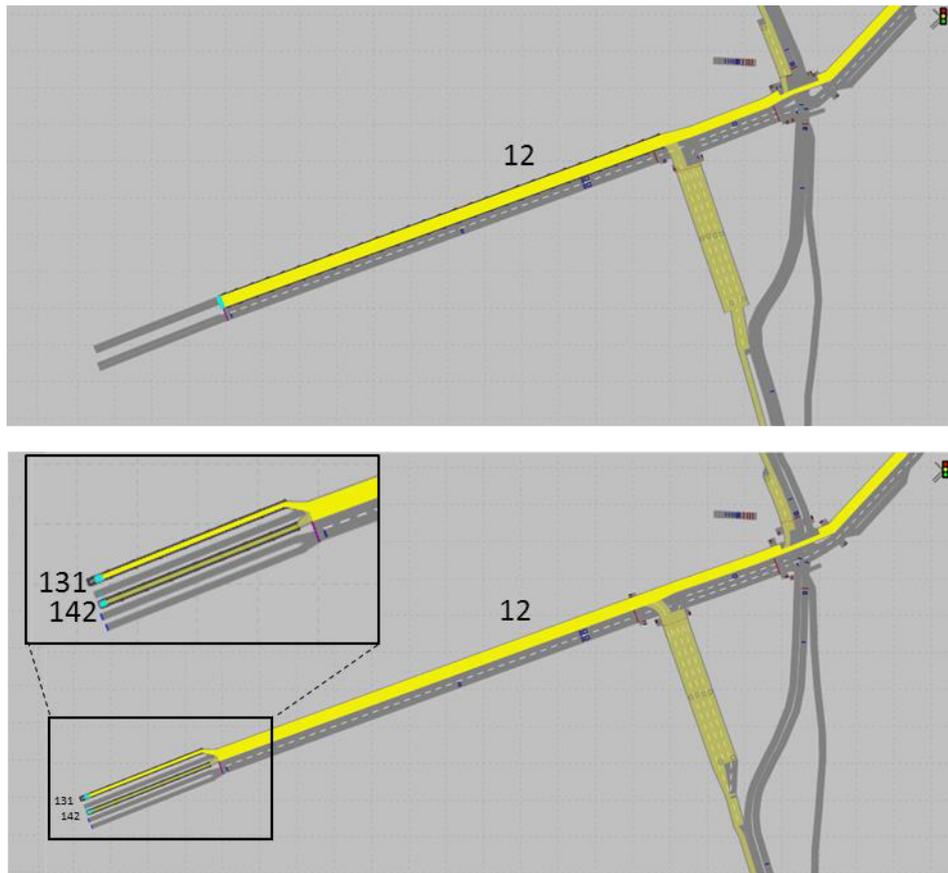


Abbildung 47: Routenentscheidung Keplerbrücke

Im Zuge der geometrischen Anpassungen wurden weitere Fahrzeugrouten verändert, auf diese wird im Zusammenhang mit der Geometrie Anpassung noch genauer eingegangen.

ÖV Linien und Haltestellen

Der öffentliche Verkehr musste aufgrund mehrerer Aspekte überarbeitet werden. Zum einen wurden alle Gelenkbusse auf normale Busse umgestellt, da nur diese auch in PC-Crash nachsimuliert werden können. Die weiteren Anpassungen betreffen die Haltestellenbereiche am Geidorfplatz. Ähnlich wie die Statische Fahrzeugrouten, wird die Streckenfolge über die ÖV-Linie angegeben. In Richtung Bergmannngasse lagen die ÖV-Linien auf denselben Strecken wie der MIV. Die Folge davon war, dass der Bus auf der Strecke 29 einen Fahrstreifenwechsel vollziehen musste, um die Bushaltestelle anzufahren. Dies führte einerseits zu einer Blockierung des MIVs und andererseits auch zu unrealistischen Fahrmanövern und Konflikten. Dasselbe Problem ergab sich beim Ausfahren aus der Haltestelle, bei dem die Busse wiederum die Fahrspur wechseln mussten. Aus diesem Grund wurden alle dort passierenden ÖV-Linien über den Verbinder 10041 gelegt und Linie 39 in Richtung Wirtschaftskammer über den Verbinder 10028 geführt.

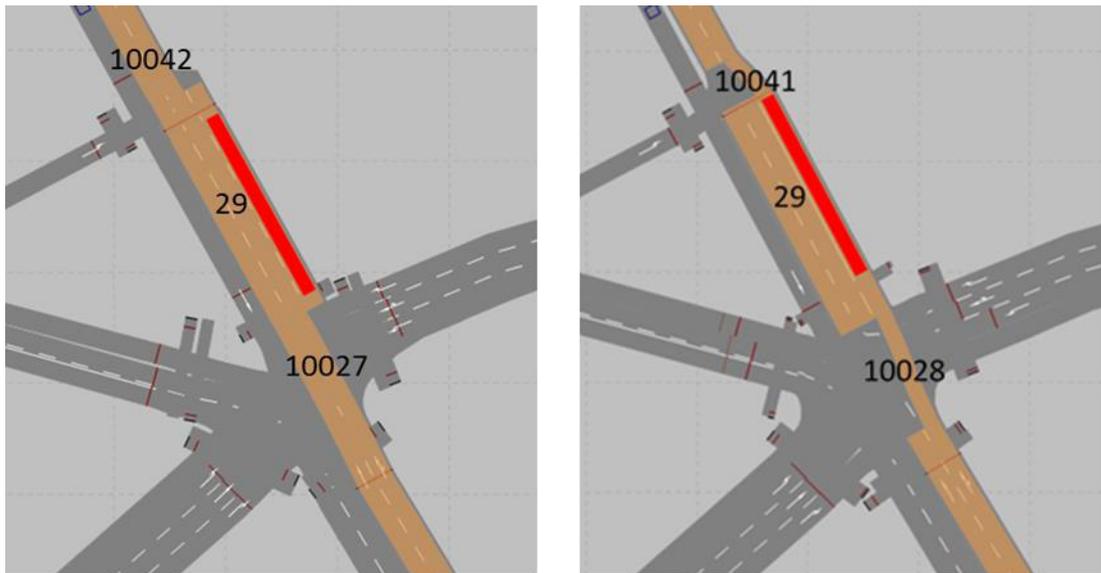


Abbildung 48: ÖV-Linienführung Lendplatz

Im Rahmen der oben beschriebenen Adaptierungen, ebenso wie in der nachfolgenden Geometrieangepassung wurden weitere Netzelemente, wie beispielsweise Signalgeber oder Langsamfahrbereiche, von der Position oder Größe mitverändert. Auf diese wird nicht im Detail eingegangen, da sie nicht zu den maßgeblichen Überarbeitungen zählen.

Die Geometrieangepassungen umfassen drei wesentliche Aspekte. Erstens mussten punktuelle Veränderungen gesetzt werden, einerseits um Verbesserung hinsichtlich der Querschnittsmessungen zu erzielen und andererseits um unerwünschte Fahrmanöver zu vermeiden. Zweitens wurden das gesamte Netz in der Ebene soweit wie möglich den realen Geometriebedingungen angepasst. Dabei stand im Fokus, einerseits Modellierungsungenauigkeiten, wie beispielsweise sich überlappende Strecken, zu eliminieren aber auch das Netz an die realen Geokoordinaten anzupassen, um eine solide Grundlage für Detailuntersuchungen der Sichtweite und der Fahrdynamik zu gewährleisten. Letztendlich wurde im Bereich der Wickenburggasse das Modell auch in der Höhe angepasst.

Punktuelle Adaptierungen

Größere punktuelle Veränderungen wurden an zwei Bereichen durchgeführt. Einerseits am Knoten Bergmannngasse/Humboldtstraße und andererseits am Franz-Josef-Kai. Im ersten Fall zeigte sich, dass die ursprüngliche Streckenführung einen Konfliktpunkt für die nach links abbiegenden Busse darstellt. Behoben wurde diese Problematik mittels einer kontinuierlichen Streckenaufweitung von einem auf zwei Fahrstreifen. Dafür wurde eine zusätzliche kurze Strecke (Nr. 140) eingefügt und diese bereits mit einem sehr schmalen (10 cm) zweiten Fahrstreifen ausgestattet. Ausgehend von der einstreifigen Strecke wurde der Verbinder 10000 zu dieser Strecke gelegt. Der bereits bestehende Verbinder 10003 wurde verlängert und über beide Fahrstreifen geführt. Das Ergebnis ist ein sanfterer Übergang von einem auf zwei Fahrstreifen, anhand dem die VISSIM-Fahrzeuge auch bei beengten Verhältnissen in der Lage sind, sich ohne abrupte Bewegungsänderung richtig einzuordnen.

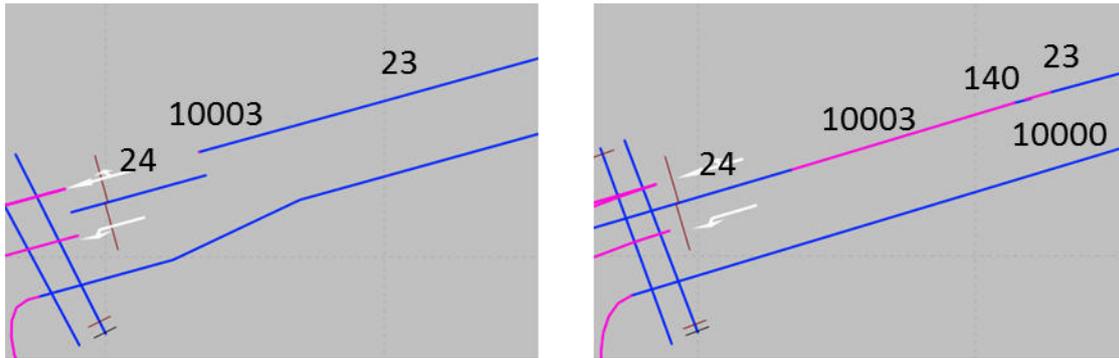


Abbildung 49: Streckenaufweitung Humboldtstraße

Die zweite punktuelle Veränderung liegt am Franz-Josef-Kai und wurde mit dem Ziel durchgeführt, bessere Querschnittswerte an dieser Stelle zu erzielen. Hier wurde in Anlehnung an die Methode der Streckenaufweitung in Kombination mit einer Veränderung der Routenentscheidungen angestrebt, die Fahrstreifenwahl der VISSIM-Fahrzeuge zu beeinflussen. Dabei wurden der Verkehr über zusätzliche Verbinder (10351,10350) in Links- und Rechtsabbieger unterteilt und mit der bereits beschriebenen Methode der Streckenaufweitung auf das vierstreifige Streckensegment übergeleitet.

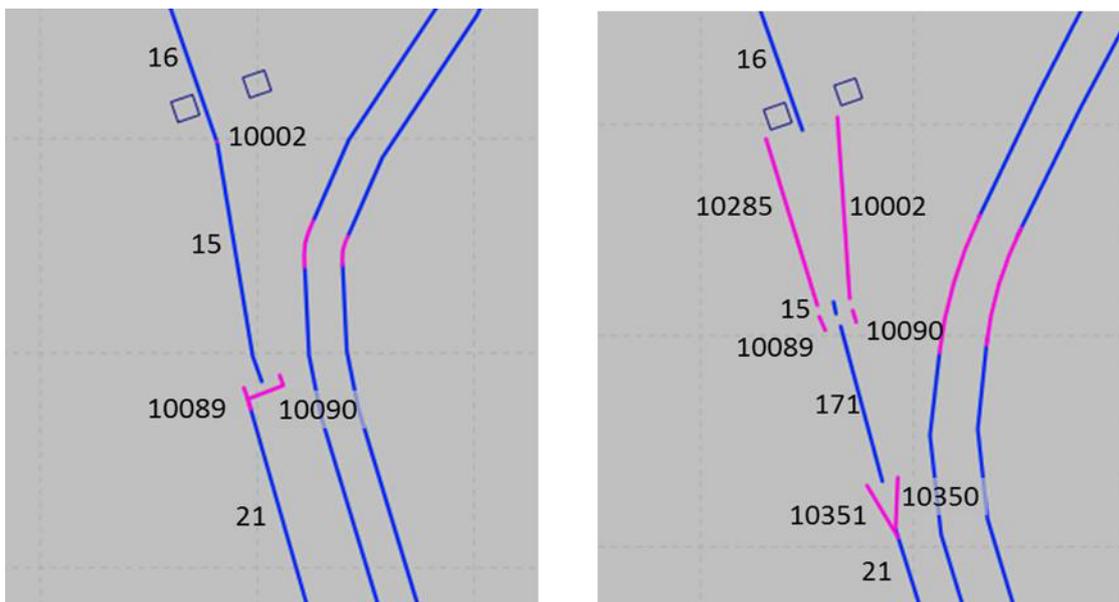


Abbildung 50: Streckenanpassung Kaiser-Franz-Josef-Kai

Geometrieadjustierungen in der Ebene

Für die Anpassung in der Ebene wurde zunächst das Netz auf diejenigen Streckenungenauigkeiten untersucht, die Ursache für unrealistische Konfliktsituationen waren. Dabei gab es im gesamten Netz drei vorrangige Typen von Problempunkten, nämlich Überlappungen, Kurven und, insbesondere bei Fußgängern, zu kurz modellierte Strecken. Im ersten Fall handelt es sich meist um Strecken oder Verbinder, die sich zum Teil oder gänzlich überlagerten. Ein besonderer Fall war im Bereich der Keplerbrücke gegeben, da hier für eine Strecke ein Fahrstreifen zu viel modelliert wurde und sich dieser komplett mit der Gegenfahrbahn überschneidet. In den anderen Fällen waren es meist nur Teilbereiche, die sich überlagerten. Die Folge war eine überhöhte Anzahl von Konflikten, insbesondere im Gegenverkehr.

Ein weiter Aspekt war die Gestaltung von Kurvenradien, die hauptsächlich bei Bussen und LKWs aufgrund ihrer Abmessungen zu unrealistischen Konflikten mit anderen Verkehrsteilnehmern führten. So beispielsweise am Knoten Körösisstraße/Wickenburggasse, wo bei den geometrischen Gegebenheiten, der LKW die wartenden Fußgänger der Signalgruppe 501-10 und 501-11 überfahren würde.

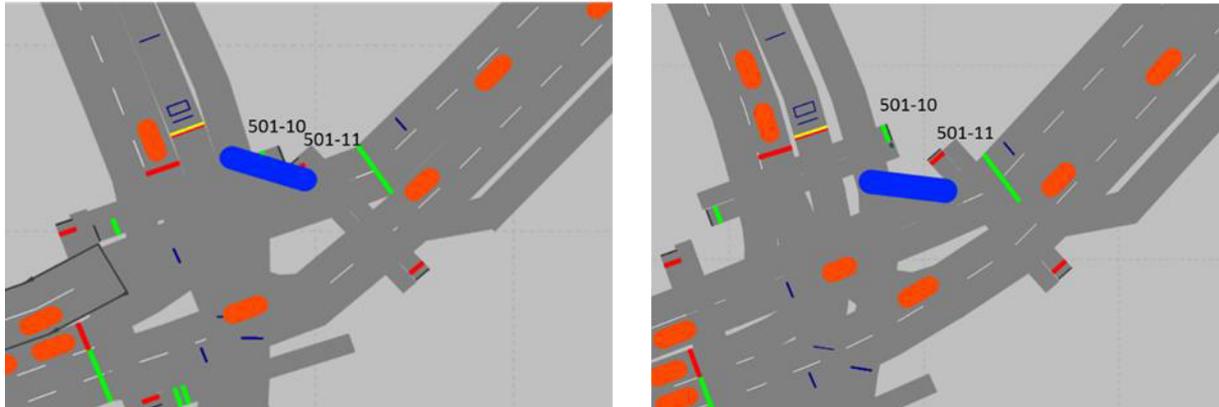


Abbildung 51: Konfliktpunkt Körösisstraße

Dieser potentielle Konflikt steht auch noch mit einem anderen Problem in Zusammenhang. So lagen die meisten Signalgeber der Fußgängerübergänge in oder sehr nah an der Fahrbahn. Auch wenn Konflikte mit Fußgängern in dieser Studie nicht betrachtet werden, so spielen sie in weiterer Folge für die Nanosimulation eine Rolle. Außerdem ergibt sich in Kombination mit Konfliktflächen ein weiteres Problem. Bei bedingter Verträglichkeit zwischen Fußgängern und motorisiertem Verkehr wurden an den Fußgängerübergängen Konfliktflächen gelegt. In Abbildung 52 ist ein Fußgänger zu sehen, der an der VLSA wartet. Infolge dessen, dass der Signalgeber in der Fahrbahn liegt und der Fußgänger Vorrang hat, können die Fahrzeuge aufgrund des wartenden Fußgängers die Konfliktfläche nicht mehr passieren, obwohl sie grün haben. Dieses Problem wurde mit einer genaueren Anpassung der Fußgängerübergänge behoben.

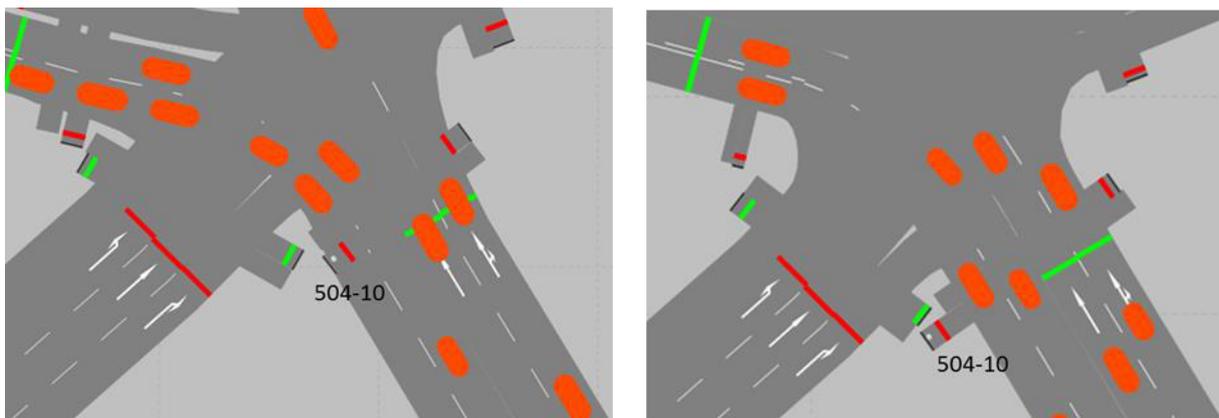


Abbildung 52: Konfliktpunkt Fußgänger Geidorfplatz

Abschließend wurde das Netz genauer an die Geokoordinaten angepasst. Zur Verwendung kam hierbei die von VISSIM zur Verfügung gestellte Hintergrundkarte von OpenStreetMap. In der folgenden Abbildung sieht man einen Vorher-Nachher-Vergleich bezüglich geometrischer Anpassungen im östlichen Bereich der Wickenburggasse.



Abbildung 53: Geometrische Netzanpassung

Hier zeigt sich die hohe Bedeutung der genauen Geometrieadjustierungen bezüglich der Sichtweitenproblematik. So sind am Knoten Laimburggasse/Wickenburggasse die Gebäudekanten ein maßgeblicher Faktor für die Sichtweite. Diese liegen nach der Anpassung deutlich näher an der Fahrbahn der Wickburggasse, was zu einem reduzierten Überblick an diesem Knotenpunkt führt.

Geometrieadjustierungen in der Höhe

Letztendlich wurden im Gebiet der Wickenburggasse noch Höhenadjustierungen durchgeführt. Diese finden im Rahmen dieser Studie weniger Bedeutung, sind aber für weitere nanoskopische und grafische Analysen notwendig. Ausgegangen wurde hierbei von einer Abbildung der Höhengichtlinien, die dem Modell hinterlegt wurde. Das Nullniveau aus VISSIM wurde bei 400 m.ü.A. angesetzt. In VISSIM gibt es keine Möglichkeit die Zwischenpunkte der Strecken direkt anzupassen, deshalb wurde hier ein Umweg gewählt. Für die betroffenen Strecken wurde zunächst der z-Versatz am Beginn und am Ende der Strecke in VISSIM manuell eingegeben. Dann wurden Streckenzwischenpunkte auf die entsprechenden Höhengichtlinien gesetzt. Abschließend wurden das Modell als Textdatei geöffnet und der z-Versatz der Zwischenpunkte anhand der Höhengichtlinien angepasst.



Abbildung 54: Hörschichtlinien zur Anpassung der z-Koordinaten

Ergebnisse

Alle diese Anpassungen zusammengefasst führen zu Szenario REF V2, dessen Ergebnisse in Folge dargestellt werden. Die Auswirkungen der beschriebenen Maßnahmen führen zu Veränderungen insbesondere bezüglich Verkehrsstärke und Konflikten, während die Reisezeit weitgehend gleichgeblieben ist. Die Ergebnisse hier sind wieder nur auf den Szenarienvergleich konzentriert, während die Einzelauswertungen dem Anhang 8.1.1 und 8.1.2 zu entnehmen sind. Die Auswertung der Verkehrsstärke zeigt, dass die Netzanpassungen einen positiven Effekt auf den GEH-Wert haben. Die problematischen Querschnitte am Kaiser-Franz-Josefs-Kai (Kaiser_17_3, Kaiser_17_4) sowie an der Keplerbrücke in Richtung Westen (Kepler_16) haben sich gravierend verbessert und liegen nun unter dem geforderten Grenzwert, wobei der GEH-Wert bei Kaiser_17_4 sogar bei 0 liegt. Im Gegenzug dazu haben sich allerdings die beiden ersten Fahrstreifen des Kaiser-Franz-Josef-Kais mit einem GEH-Wert von 3,3 bzw. 3,0 verschlechtert, liegen aber damit trotzdem noch unter dem Grenzwert. Auch der Querschnitt Wicken_18_2, der im REF V1 genau bei 5 lag, ist auf 4,5 gesunken. Kaum Veränderungen ergeben sich in der Parkstraße (Parkst_15) und an der Keplerbrücke in Richtung Osten (Kepler_18). Diese Ergebnisse zeigen, dass die Maßnahmen bezüglich der Fahrstreifenwahl im Bereich der Keplerbrücke einen wesentlichen Beitrag zu einer besseren Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation geleistet haben.

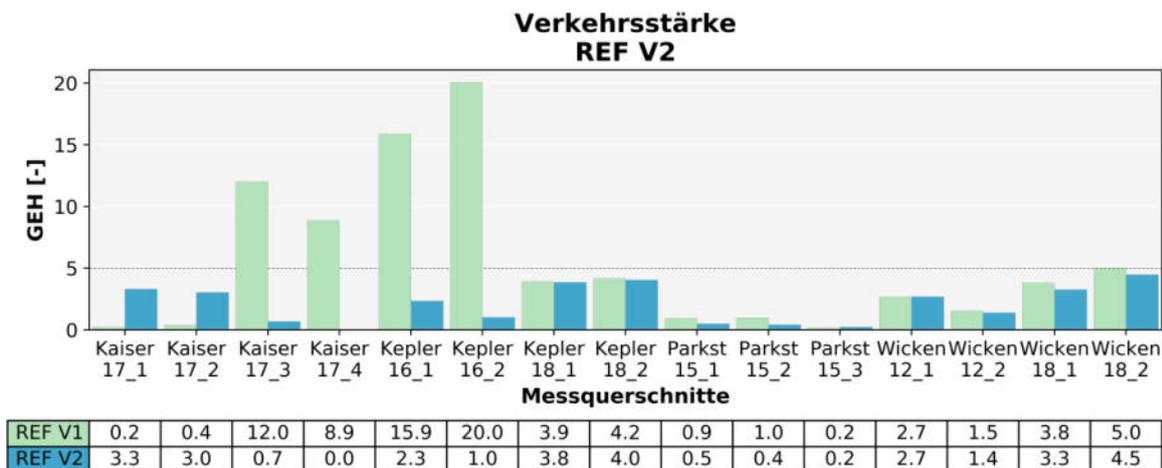


Abbildung 55: REV V2 - Verkehrsstärke

Die Abweichung der Reisezeiten hat sich bei Ri_O_Wicken_Wicken und Ri_W_Humbo_Kepler auf 28,4 % und 20,0 % verringert. Im Gegenzug dazu haben sich die Ergebnisse des Abschnittes Kepler_Jahn auf 21,5 % und in Richtung Westen Wicken_Wicken auf 26,6 % verschlechtert. Die Netz-anpassungen innerhalb der Wickenburggasse betreffen hauptsächlich die Geometrie, da nur ein Knotenpunkt mit entsprechenden Anpassungen der Vorfahrtsregeln vorhanden ist. Somit ist es interessant, dass aufgrund der Maßnahmen in den beiden Abschnitten Wicken_Wicken sich in Richtung Westen die Reisezeitergebnisse verschlechtert und in Richtung Osten verbessert haben. In den beiden Abschnitten, die über die Wickenburggasse hinausgehen und somit insgesamt drei signalgesteuerte Knotenpunkte enthalten, liegt hingegen bezüglich Abweichung eine Reduktion in Richtung Westen (Humbo_Kepler) und eine Steigerung in Richtung Osten (Kepler_Jahn) vor. Aus diesen Ergebnissen lassen sich somit weder Tendenzen bezüglich der Fahrtrichtung noch der Anzahl der überfahrenen Knoten erkennen. Die Reisezeit wird folglich von den gesetzten Maßnahmen in sehr unterschiedlicher Weise beeinflusst.

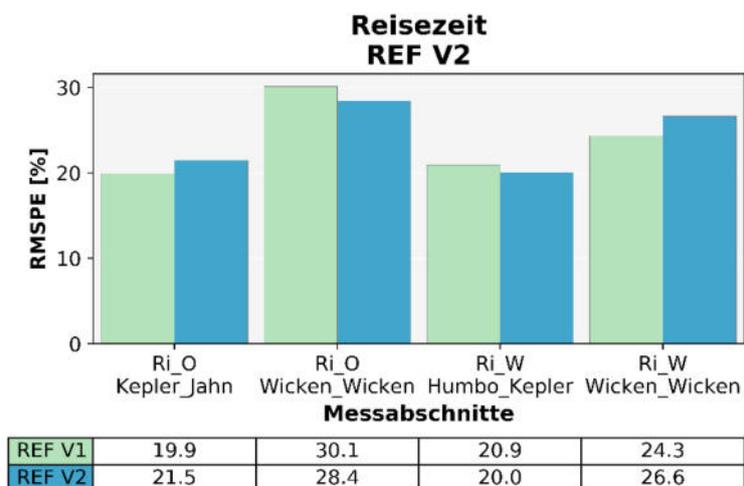


Abbildung 56: REF V2 - Reisezeit

Wie bereits erwähnt haben die Adaptierungen auf die gefilterten Konflikte aufgrund des TTC-Wertes von Null nur bedingt einen Einfluss. Allerdings zeigen sich die Veränderungen sehr deutlich anhand der

ungefilterten Konflikte, deren Anzahl sich von 21836 bei REF V1 auf 4913 bei REF V2, also um fast 78 %, reduziert hat.

Unter Anwendung der Filterbedingungen haben sich Konflikte, gemittelt über die zehn Simulationsläufe, um 14 % verringert, wobei die größte Veränderung bei Crossing-Konflikten auftritt. Hier ergibt sich nicht nur eine relative Reduktion von 60 %, deren Ausmaß auch auf die geringe Anzahl an Ausgangskonflikten in Szenario REF V1 zurückzuführen ist, sondern auch in absoluten Zahlen treten hier die größten Veränderungen auf. Auch Lane-Change-Konflikte haben sich aufgrund der Maßnahmen um 42 % reduziert, während sich Rear-End-Konflikte nur um 4 % verringert haben. Aus diesen Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Einführung der Vorrangregelungen und die genauere Anpassung der Geometrie das Potential besitzen, Konflikte, insbesondere bei Crossing- und Lane-Change-Konflikten zu reduzieren. Die geringe Auswirkung auf die Rear-End-Konflikte macht deutlich, dass dieser Typ kaum von diesen Maßnahmen beeinflusst ist und Veränderungen über die in Unterabschnitt 5.1.1 behandelte Variation der Fahrverhaltensparameter zu forcieren sind.

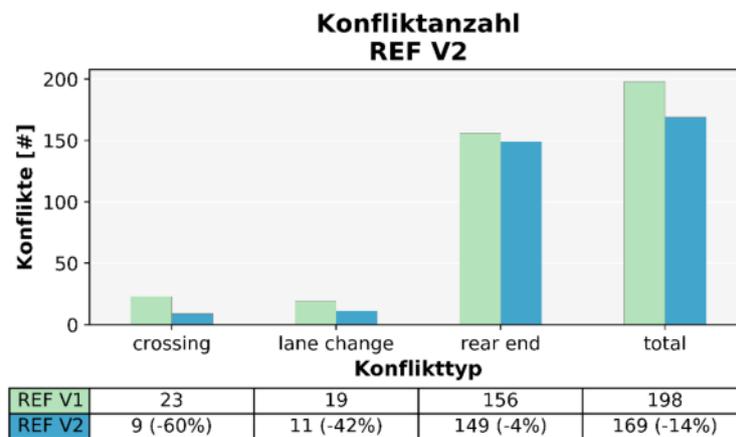


Abbildung 57: REV V2 -Konfliktanzahl

Auch bei den Konfliktkenngrößen sind Veränderungen zu beobachten. Im REF V2 sind unter 1,0 Sekunde nur noch Ausreißer vertreten und das erste Quartil liegt mit 1,3 um 0,5 Sekunden höher als im REF V1. Die restlichen Lageparameter bleiben allerdings gleich. PET hingegen hat einen Anstieg aller Quartile zu verzeichnen. Besonders deutlich ist hier auch wieder der Anstieg des 25 % Quantil, das sich um 1,4 auf 2,0 Sekunden im REF V1 erhöht hat. Durch die Netzadaptierungen sind nicht nur weniger, sondern leichtere Konflikte generiert worden. Anhand der deutlichen Unterschiede zwischen den beiden Szenarien ist ersichtlich, wie ausschlaggebend sich die Modellierungsschritte auf die Konflikte auswirken.

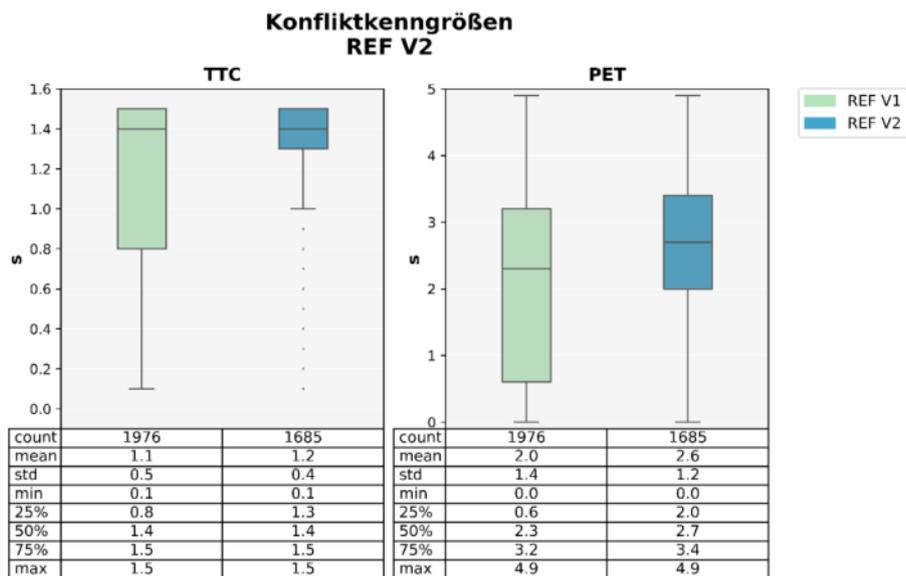


Abbildung 58: REV V2 - TTC und PET

Die Konfliktkarte zeigt die Reduktion der Konflikte in den Knotenpunkten, die vor allem auf die Anpassungen der VLSA 503, die Vorrangregelungen via Konfliktflächen und Querverkehrsstörungen und die veränderte Geometrie zurückzuführen sind. Die in der Humboldtstraße und am Kaiser-Franz-Josef-durchgeführten Adaptierungen haben bezüglich Konflikte wenig Einfluss.



Abbildung 59: REF V2 - Konflikte im Netz

4.4.6 Netzerweiterung Lendplatz (REF V3)

Die Notwendigkeit einer Netzerweiterung ist aufgrund des Mangels an geeigneten Knotenpunkten zur Untersuchung von Fahrradkonflikten entstanden. Das erweiterte Untersuchungsgebiet erstreckt sich nun in Richtung Westen bis zum Marienplatz und umfasst zwei signalisierte Knotenpunkte. Neben dem MIV durchfahren dieses Gebiet zwei öffentliche Buslinien, außerdem ist eine Radverkehrsanlage vorhanden. Die Ausdehnung an der Nord-Südachse ausgenommen der Neubaugasse geht vom Beginn der Wienerstraße bis zum südlichen Ende des Lendplatzes. In Abbildung 60 ist das Netz des erweiterten Untersuchungsgebietes dargestellt.

Tabelle 10: Zuflüsse Keplerstraße REF V0

Intervall	0	900	1800	2700	3600	4500
Keplerstraße	426	426	477	423	398	398

Tabelle 11: Zuflüsse Lendplatz REF V3

Intervall	0	900	1800	2700	3600	4500
Keplerstraße (Strecke 170)	328	328	367	326	306	306
Lendplatz_N (Strecke 161)	41	41	46	40	38	38
Lendplatz_S (Strecke 160)	122	122	137	120	114	114
Neubaugasse_N (Strecke 142)	5	5	5	5	5	5

Durch die Netzerweiterung war es notwendig, neue Routenentscheidungen zu implementieren. Im Zuge dessen wurden auch die bereits bestehenden Routen noch einmal überarbeitet, um den Querschnittsmessungen besser zu entsprechen. An dieser Stelle werden nur die zentralen Routenentscheidungen im Gebiet um den Lendplatz beschrieben. Eine vollständige Liste der überarbeiteten Routenentscheidungen ist dem Anhang 8.2.1 zu entnehmen. Zu Beginn mussten zunächst die relativen Belastungen der bereits bestehenden Routenentscheidung 3 adaptiert werden. Dabei wurden die prozentuellen Anteile ermittelt und anhand denen eine Umverteilung durchgeführt. In Tabelle 12 sind die Belastungen vor und nach der Netzerweiterung gegenübergestellt. Auffallend ist hier, dass ein hoher Anteil an Fahrzeugen bereits vor der Keplerbrücke abgeleitet wird. Begründet kann dies dadurch werden, dass der Zufluss insgesamt am Lendplatz erhöht wurde und sich eine Verschlechterung der Querschnittswerte an der Keplerbrücke sowie in der Wickenburggasse ergab. Mit den letztendlich iterativ ermittelten relativen Belastungen konnten die Anforderungen bezüglich Knotenstrombelastung am Lendplatz sowie Querschnittswerte in Richtung Wickenburggasse erfüllt werden.

Tabelle 12: Routenentscheidung 3 vor und nach Netzerweiterung

Routenentscheidung		Route			
Nummer	Name	Nummer	Zielstrecke	Relative Belastung REF V0	Relative Belastung REF V3
3	ANM-Bezirk 1000005	11	47: Körösisstraße	175 (41%)	112 (34%)
		12	111: Bezirksanbindung	19 (4%)	13 (4%)
		13	60: Heinrichstraße / B72	54 (13%)	30 (9%)
		14	113: Bezirksanbindung	2 (0%)	2 (1%)
		15	14: Laimburggasse	38 (9%)	26 (8%)
		16	6: Glacisstraße / B67a	140 (32%)	88 (27%)
		17	22: Humboldtstraße	3 (1%)	2 (1%)
		18	143: Neubaugasse		30 (9%)
		19	162: Lendplatz		20 (6%)
		20	163: Lendplatz		5 (2%)

Insgesamt wurden für den MIV drei neue Routenentscheidungen in der Neubaugasse, Lendplatz Süd und Nord angelegt. Ausgehend von der relativen Belastung in der Keplerstraße wurden die jeweiligen Anteile der Routen eruiert. Die Routenentscheidung Lendplatz Süd hat allerdings einen geringeren Anteil in Richtung Neubaugasse. Dies geht von der Überlegung aus, dass das Gebiet südlich der Neubaugasse direkt erreicht werden kann und damit die Route über die Keplerstraße kein hohes Maß an Attraktivität aufweist. Eine Übersicht der Routen ist in Anhang 8.2.1 zu ersichtlich.

Fahrradverkehr

Der Radverkehr und die damit inbegriffene Modellierung der separierten Radverkehrsanlage wird in dieser Studie nur in dem für diesen Modus relevanten Bereich von der Keplerstraße über den Lendplatz bis zum Ende der Keplerbrücke durchgeführt.

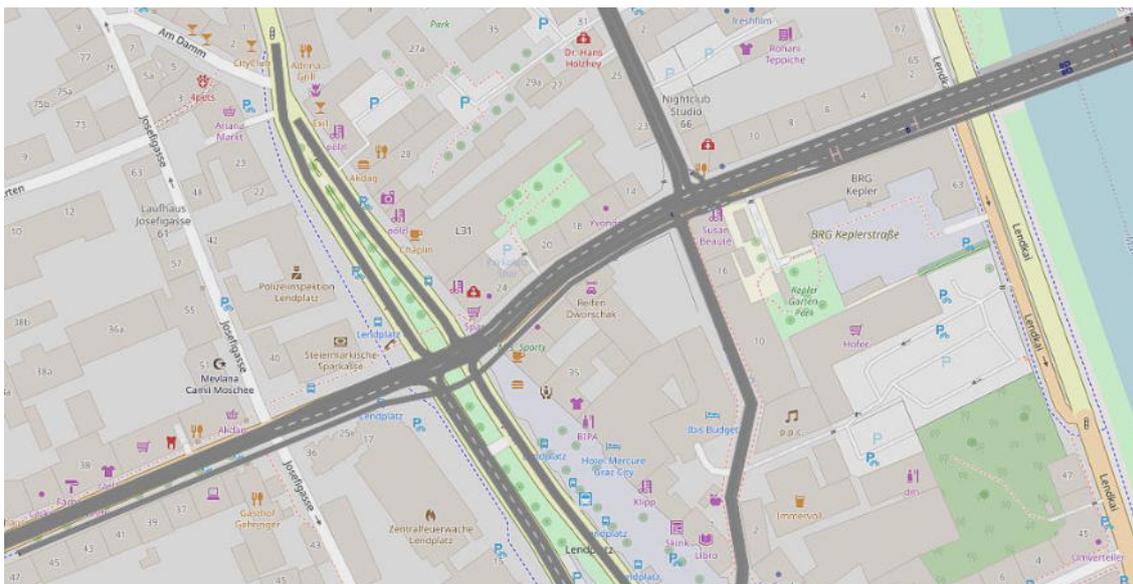


Abbildung 62: Netzerweiterung Lendplatz mit Radverkehrsanlage

Zusätzlich wurde eine signalisierte Radüberführung am Knoten Neubaugasse/Keplerstraße in das Netz integriert. Dieser Knoten stellte eine besondere Herausforderung dar, da eine geeignete Anlage für den wartenden und passierenden Fahrradverkehr gestaltet werden musste. Obwohl die Defaulteinstellungen des Fahrverhaltens „Radweg“ ein Überholen am selben Fahrstreifen prinzipiell ermöglichen, war es aufgrund der Konfliktflächen und der beengten Verhältnisse nicht möglich, den Wartebereich allein über die Fahrstreifenbreite zu modellieren. Gelöst wurde dieses Problem mit einem zweistreifigen Wartebereich in Kombination mit einer speziellen Routenlegung. Fährt beispielsweise ein Fahrradfahrer von der Keplerbrücke und möchte die Überfahrt passieren, so wird er entlang der Route über Verbinder 10325 auf den zweiten Fahrstreifen geleitet, der als Wartebereich dient. Die anderen Fahrräder aus dieser Richtung gelangen hingegen über den Verbinder 10321 auf den ersten Fahrstreifen und können den Wartebereich passieren. Ebenso wurde der Verflechtungsbereich nach der Wartezone so gestaltet, sodass die aus der Neubaugasse Süd kommenden Radfahrer und die Geradeausfahrer über zwei Verbinder eingeleitet werden.

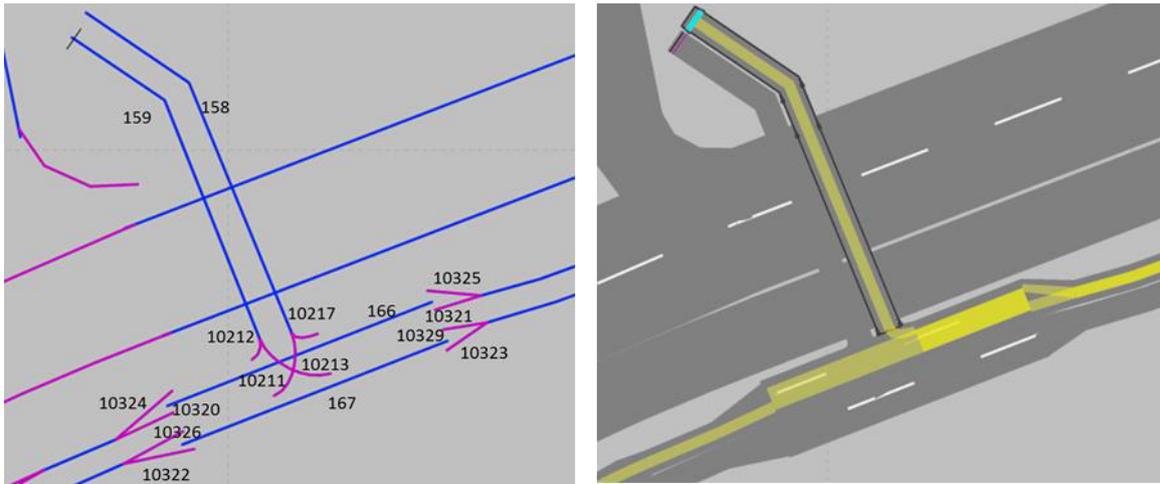


Abbildung 63: Wartebereich Neubaugasse

Zur Modellierung der Zuflüsse wurden Zähldaten der Stadt Graz an der Keplerbrücke aus dem Jahr 2017 (Stadt Graz, 2019) herangezogen. Aufgrund der ähnlichen Wetterlage kamen Daten aus Oktober und März zur Anwendung, die letztendlich im Modell zu einem DTV von 6.000 Fzg resultierten. Für die Spitzenstunde wurden 5 % des DTV angenommen, davon für die Fahrtrichtung O-W 40 % und die Gegenrichtung 60 %. Somit ergibt sich ein Zufluss an der Keplerbrücke von 120 Fzg/h und 180 Fzg/h in der Keplerstraße. Zusätzlich wurden in der Neubaugasse Zuflüsse von jeweils 5 Fzg/h festgelegt.

Tabelle 13: Zuflüsse Fahrradverkehr

Fahrradverkehr		
DTV	6000 [Fzg/d]	
Spitzenstunde	300 [Fzg/h]	5% des DTVs
Zufluss Keplerbrücke	120 [Fzg/h]	40% der Spitzenstunde
Zufluss Keplerstraße	180 [Fzg/h]	60% der Spitzenstunde
Zufluss Neubaugasse N	5 [Fzg/h]	Abschätzung
Zufluss Neubaugasse S	5 [Fzg/h]	Abschätzung

Die Hauptrouten des Fahrradverkehrs verlaufen über die Keplerstraße, allerdings wurde noch ein geringer Anteil in die Neubaugasse sowie über den Fahrradübergang an der Neubaugasse geführt. Die tabellarische Übersicht der Routenführung ist dem Anhang 8.2.2 zu entnehmen. Für die Wunschschnwindigkeit wurde eine der Defaultverteilungen mit Werten zwischen 20 und 25 km/h gewählt. Langsamfahrbereiche wurden hingegen mit Geschwindigkeiten zwischen 4 und 6 km/h angesetzt.

VLSA

Der Lendplatz verfügt in der Realität über eine sehr umfangreiche und komplexe VLSA, unter anderem auch aufgrund der dort angesiedelten Feuerwehorausfahrt. Da in dieser Studie diese VLSA lediglich den Auftrag hat, den Zufluss zur Keplerbrücke zu regulieren, wurde auf eine ausführliche Modellierung verzichtet und stattdessen eine Dummy-VLSA mit Festzeitsteuerung (Nr. 505) modelliert. Dafür kamen die aus der Zählung ermittelten Daten und daraus abgeschätzte Parameter für die Gestaltung der VLSA zur Anwendung. In Abbildung 64 sind die Signalgeber mit der jeweiligen Signalgruppe dargestellt.



Abbildung 64: Signalgruppen der VLSA 505

Ausgehend von einer aus der Zählung ermittelten Umlaufzeit von 94 Sekunden und zwei Signalgruppen wurde iterativ die VLSA 505 an die Bedingungen des Modells angepasst. Insgesamt ergaben sich vier Signalgruppen, wobei auch der Fahrradverkehr mitberücksichtigt wurde. Die Signalgruppe 505-1 gilt für die aus Westen kommenden Fahrzeuge und 505-2 für die aus dem nördlichen und südlichen Ende des Lendplatzes. Für den Fahrradverkehr und den Verkehr nach Osten ist eine eigene Signalgruppe 505-3 erstellt worden. Diese ist notwendig, um den Abfluss des Verkehrs von der Keplerbrücke zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurde auch für die Linksabbieger von Osten eine eigene Signalgruppe 505-4 erstellt.

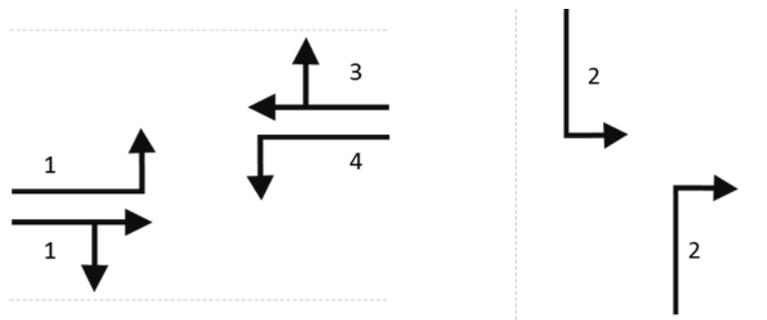


Abbildung 65: Knotenströme der VLSA 505

Die Werte aus der Zählung in Kombination mit den im Modell beobachteten Vorgängen resultierten letztendlich im aus Abbildung 66 ersichtlichen Signalprogramm. Der Signalgruppe 505-3 wird mit 65 Sekunden die längste Grünzeit gewährt, damit ein Abfließen des Verkehrs von der Keplerbrücke möglich ist. Für die Gestaltung der Signalgruppe 505-4 war die bedingte Verträglichkeit mit der Gruppe 505-1 und dem Fahrradverkehr 505-3 sowie die daraus resultierende Räumzeit wesentlich. Aus diesem Grund wurde die Grünzeit von 505-4 mit nur 20 Sekunden deklariert und eine Zwischenzeit von 10 Sekunden zur Gruppe 505-1 vorausgesetzt. Die Signalgruppe 505-2 hat eine Grünzeit von 30 Sekunden.

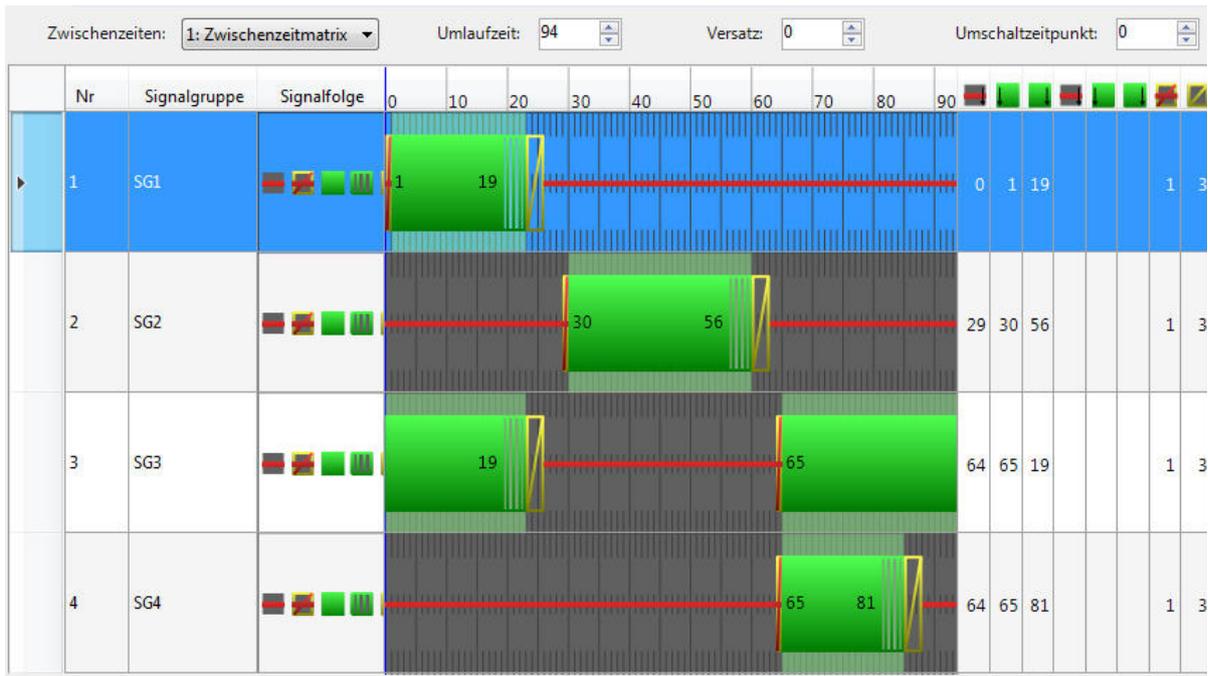


Abbildung 66: Signalprogramm der VLSA 505

Die zweite VLSA wurde am Knoten Neubaugasse/Keplerstraße mit der Nummer 507 erstellt und aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens in der Keplerstraße verkehrsabhängig modelliert. Hierfür wurden insgesamt fünf Signalgeber und drei Detektoren dem Modell hinzugefügt.

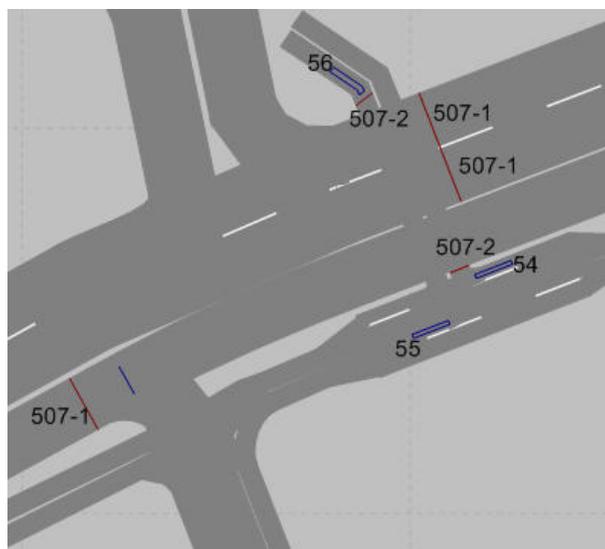


Abbildung 67: Signalgruppen der VLSA 507

Begonnen wurde dabei mit jeweils einer Signalgruppe für Radverkehr und MIV bzw. ÖV und einer Umlaufzeit von 60 Sekunden. Für die Radfahrer wurden 10 Sekunden Gründauer vorgesehen, während für den MIV und ÖPNV unter Berücksichtigung der erforderlichen Zwischenzeiten eine Gründauer von 38 Sekunden für den MIV und ÖPNV ergab. Für die verkehrsabhängige Steuerung wurden die beiden Signalgruppen jeweils einer Phase zugeordnet und die jeweiligen Phasenübergänge erstellt.

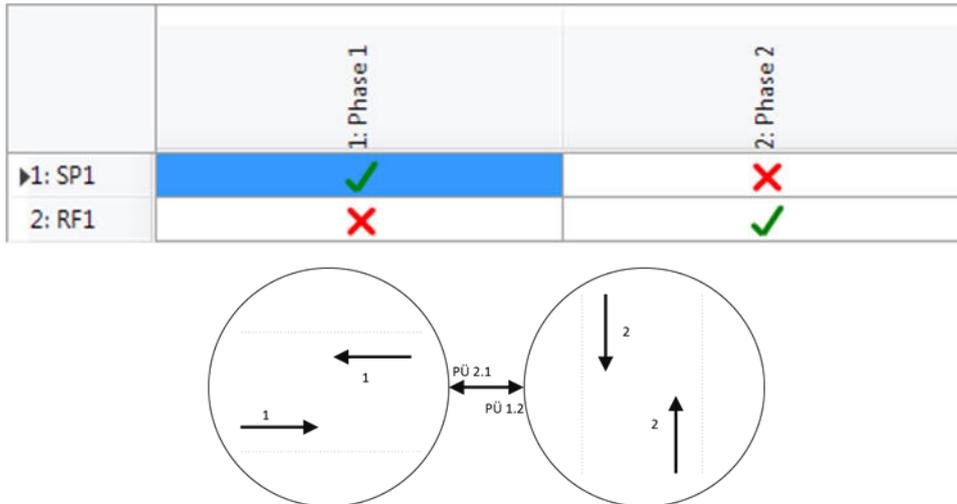


Abbildung 68: Phasen der VLSA 507

Die Steuerlogik wurde in VisVAP erstellt und die notwendigen Parameter definiert. Mit GRMin1 und GRMin2 werden die Mindestgründauern festgelegt und mit FGAnf die Belegungszeit des Fahrradverkehrs, wobei die Namensgebung aus einem anderen Szenario resultiert. Anhand der Logik, beginnt die Phase 1 und läuft solange bis einer der drei Detektoren im Wartebereich des Fahrradverkehrs länger als 0 Sekunden belegt ist und die Grünphase länger als die Mindestgrünzeit GRMin1 ist. Dann wird in die zweite Phase umgeschaltet und diese läuft solange bis die Mindestgründauer des Fahrradverkehrs GRMin2, also 10 Sekunden, erreicht ist.

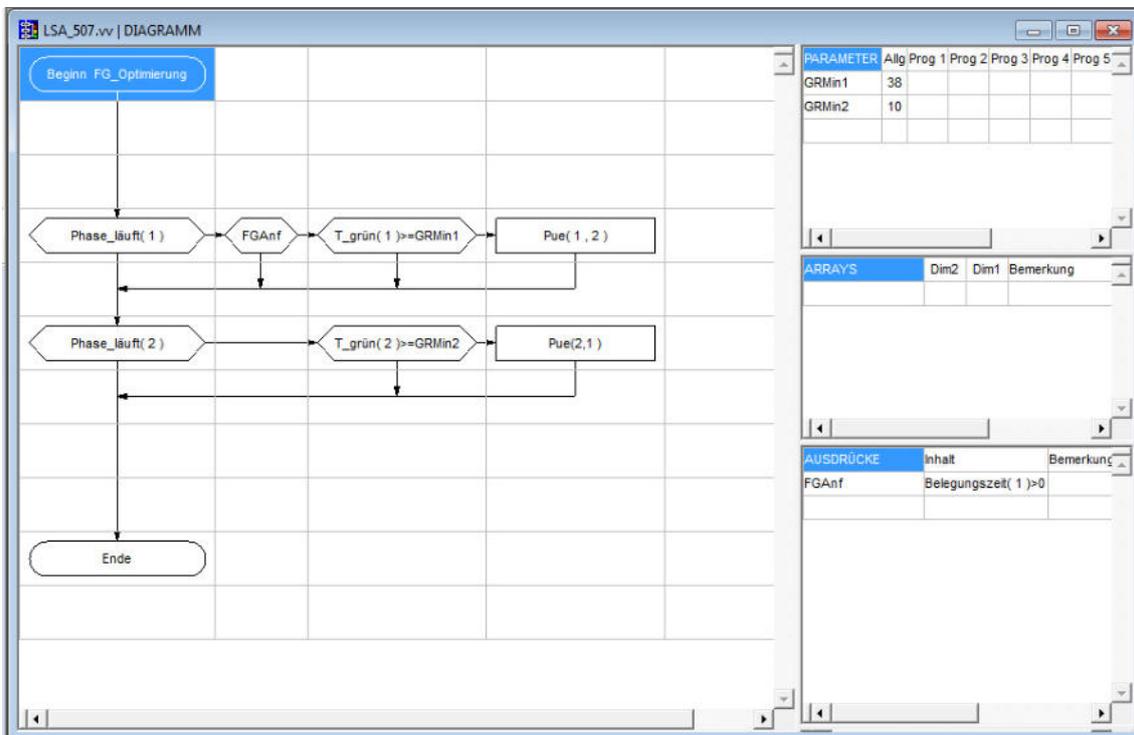


Abbildung 69: Steuerlogik der VLSA 505

Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass sich durch die Netzerweiterung am Lendplatz die Verkehrsstärken nochmals verändert haben.

So konnten die Querschnittswerte auf der Keplerbrücke unter anderem aufgrund des Einflusses der Linksabbiegerspur am Lendplatz verbessert werden. Die Umleitung des Verkehrs vom Lendplatz ausgehend in Richtung Neubaugasse hat positive Effekte auf den Querschnitt Kepler_18. Die höchsten Abweichungen ergeben sich am Querschnitt am Kaiser-Franz-Josefs-Kai, allerdings liegen dort die Werte trotz allem noch im gültigen Bereich.

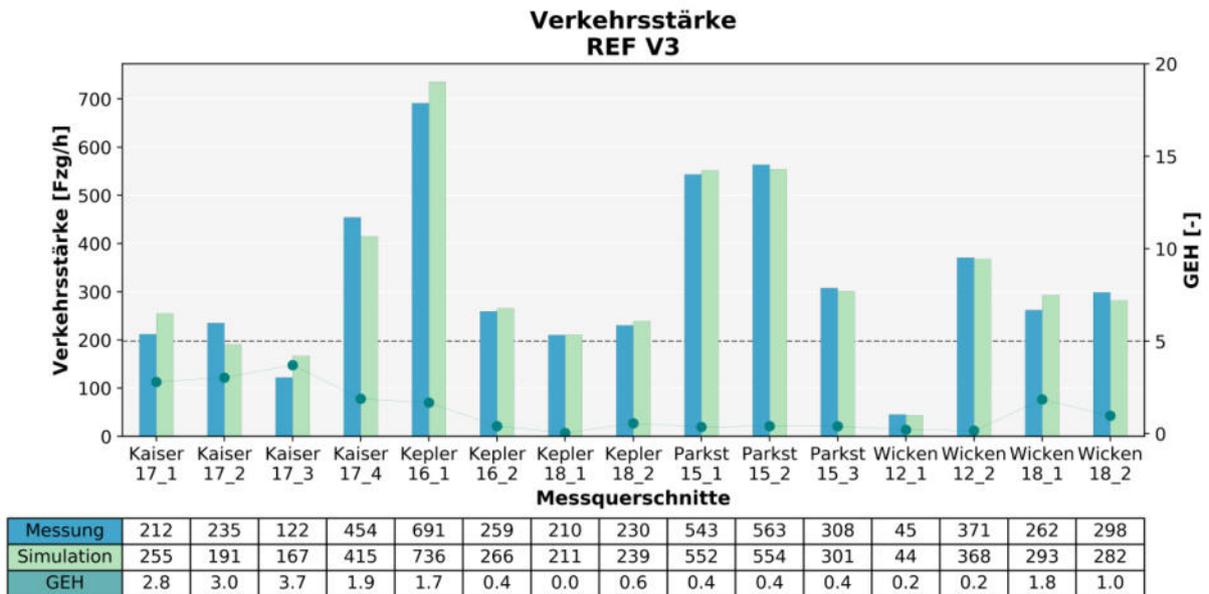


Abbildung 70: REF V3 - Verkehrsstärke

Die Reisezeit hat sich hingegen durch die Netzerweiterung insgesamt wieder verschlechtert. Zwar sind die Abweichungen niedriger als im REF V1, aber gegenüber REF V2 wieder gestiegen. Da nun weniger Verkehr in die Wickenburggasse eingeleitet wird, verkürzen sich auch durch das geringere Verkehrsaufkommen die Reisezeiten.

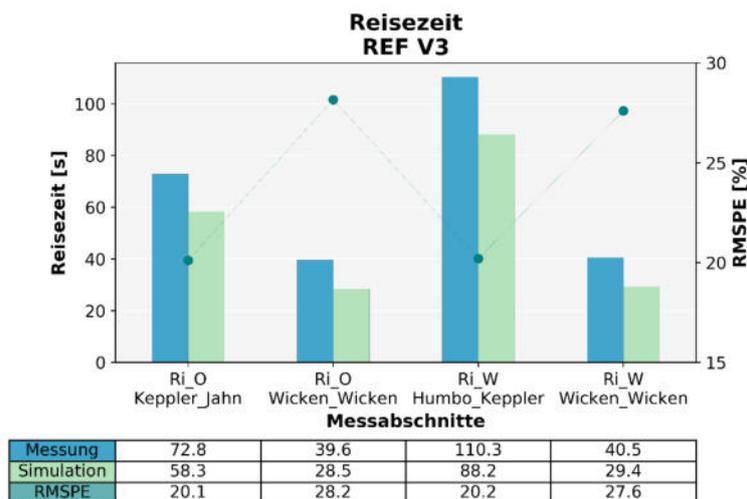


Abbildung 71: REF V3 - Reisezeit

Das Szenario REF V3 unterscheidet sich im Vergleich zu den Vorgängerszenarien nicht nur aufgrund Anpassungen im Netz, sondern es wurde in der Ausdehnung erweitert. Folglich wurden Strecken hinzugefügt, die wieder mehr Potenzial für Konflikte schaffen. Zusätzlich wurde auch Fahrradverkehr in das Netz integriert, der sich auch deutlich auf die Analyse der Konflikte auswirkt. Auf diese Thematik

wird in Abschnitt 5.1.2 noch detaillierter eingegangen. Da es sich bei REF V3 vielmehr um ein neues Netz handelt als um eine Netzanpassung, ist ein Vergleich mit den Vorgängerszenarien bezüglich Konflikte nicht zielführend. Jedoch ist eine separierte Betrachtung der einzelnen Modi an dieser Stelle aufschlussreich. Hier wird unterschieden zwischen reinen Radverkehrskonflikten, die nur zwischen Fahrrädern auftreten und den Konflikten, die nur zwischen Fahrzeugen des motorisierten Verkehrs vorkommen. In Abbildung 72 ist ersichtlich, dass durch diese Kategorisierung die Konflikte der einzelnen Modi die Gesamtkonfliktanzahl in REF V3 geben. Die diesbezügliche Diskrepanz bei den Crossing-Konflikten ist darauf zurückzuführen, dass auch zwischen dem Fahrrad- und dem motorisierten Verkehr Konflikte auftreten, die keinem Modus explizit zugeordnet werden können, aber in der Gesamtanzahl mitberücksichtigt sind. Es zeigt sich, dass in diesem Szenario und auch in den unterschiedlichen Modi die Rear-End-Konflikte wiederum dominieren. Bei den Radfahrern tritt fast nur dieser Konflikttyp auf. Dies ist einerseits auf die Defaulteinstellungen der Folgeparameter des Fahrradverkehrs und auch auf die hoch eingestellte Wunschgeschwindigkeit zurückzuführen.

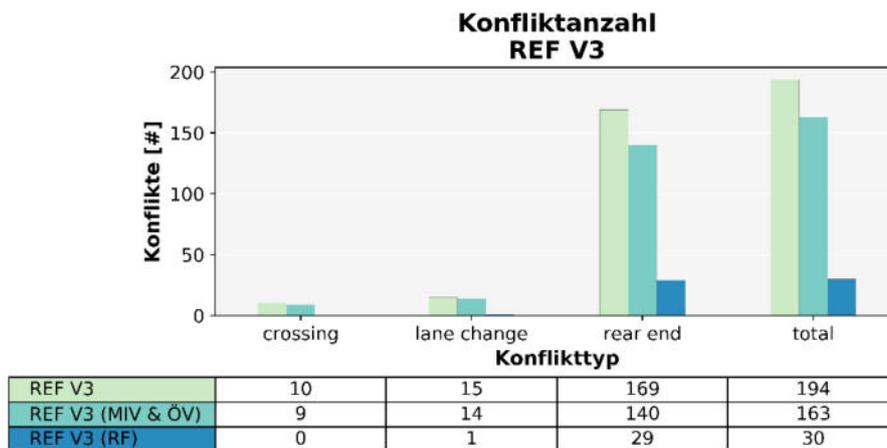


Abbildung 72: REF V3 - Konfliktanzahl

Die Konfliktkarte zeigt, dass im Bereich der Netzerweiterung vermehrt Konflikte auftreten. Zurückzuführen sind diese auf den noch unzureichend genau modellierten Fahrradverkehr und das hohe Verkehrsaufkommen vor dem Lendplatz. Im ursprünglichen Teil des Netzes haben sich hingegen die Konflikte entlang der Strecken nahezu eliminiert und treten hauptsächlich nur noch in den Wartebereichen auf.

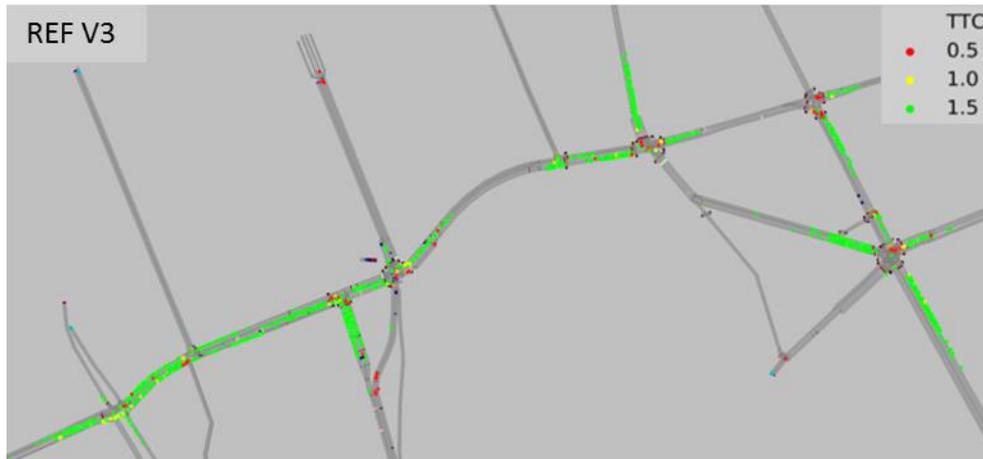


Abbildung 73: REF V3 - Konflikte im Netz

Die Analyse der Konfliktkenngrößen zeigt, dass bezüglich TTC die Konflikte im höheren Bereich angesiedelt sind und die Konfliktschwere tendenziell geringer ist. Auffallend ist jedoch, dass im Fahrradverkehr auch stärkere Konflikte auftreten, das sich in einem TTC-Minimum von 0,6 Sekunden ohne Berücksichtigung von Ausreißern ausdrückt. Der niedrige Interquartilsabstand unter 0,4 Sekunden bei PET unterstützen diese Aussage und deuten auf sehr kurze zeitliche Distanzen zwischen den Fahrzeugen auf den Konfliktflächen hin. Wird berücksichtigt, dass nur Rear-End-Konflikte auftreten, so weisen diese Ergebnisse auf Modellungenauigkeiten bezüglich Folgeverhalten hin.

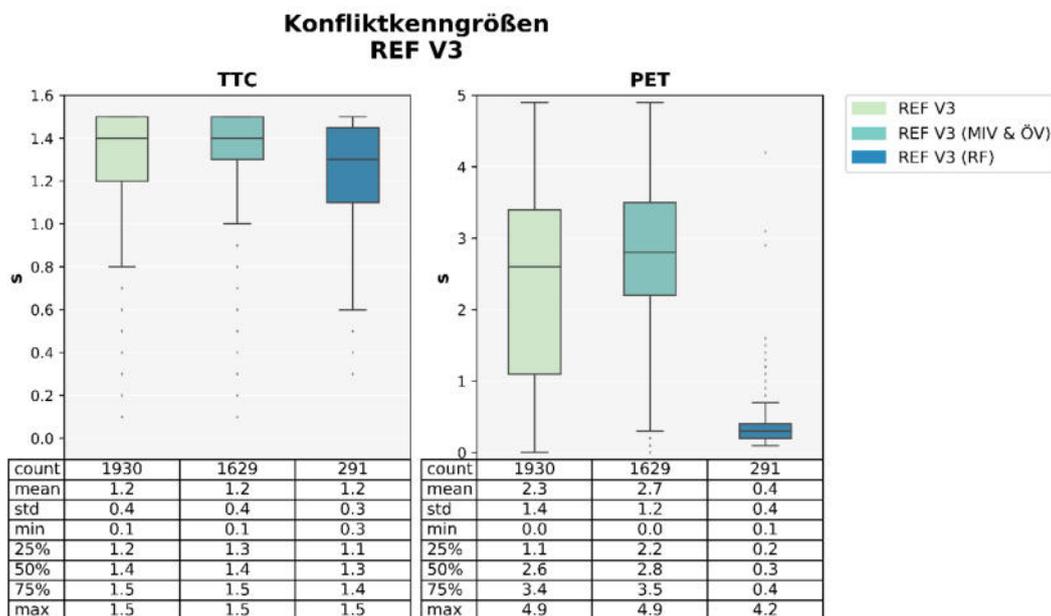


Abbildung 74: REF V3 – TTC und PET

5 Analyse sicherheitsrelevanter Parametervariationen

Die Untersuchungen zur Verkehrssicherheit beinhalten ausgewählte Themenbereiche, zu denen Parameterstudien und Detailstudien durchgeführt wurden. Da in diesem Teil der Studie die sicherheitsrelevanten Aspekte im Vordergrund stehen, wird hier auf eine Analyse der verkehrlichen Daten verzichtet. Die Ergebnisse diesbezüglich sind dem Anhang 8.1.1 und 8.1.2 zu entnehmen.

5.1 Parameterstudien

Im Rahmen der Parameterstudie werden einzelne Parameter sowie deren themenspezifische Kombinationen untersucht. Im Fokus stehen dabei das Fahrverhalten des motorisierten Verkehrs, der Fahrradverkehr, das nicht regelkonforme Verhalten sowie eine synthetische Zuflusserhöhung.

5.1.1 Fahrverhalten (REF V2)

Das Fahrverhalten ist im Gegensatz zu den anderen Parameterstudien bereits im Szenario REF V2 durchgeführt worden um einen direkten Vergleich mit dem Vorgangsszenario zu ermöglichen. Es beinhaltet in VISSIM 9 insgesamt 34 Parameter bezüglich dem Folgeverhalten, Fahrstreifenwechsel, Querverhalten und der LSA-Steuerung. Das Folgeverhalten umfasst hauptsächlich die beiden Implementierungen des Wiedemann Folgemodells mit zusätzlichen Parametern zur Vorausschauweite und der Unaufmerksamkeit. Laterale Vorgänge können anhand des Fahrstreifenwechsel- oder Querverhalten bearbeitet werden und über das Fahrverhalten an der VLSA werden Reaktionen bei unterschiedlichen Signalbildern variiert. Insgesamt sind mittels dieser Parameter standardmäßig folgende fünf Parametersätze definiert.

- Innerorts (motorisiert)
- Rechtsfahrgebot (motorisiert)
- Außerorts (freie Fahrstreifenwahl)
- Fußweg (interaktionsfrei)
- Radweg (freies Überholen)

Über den Streckenverhaltenstyp können die Parametersätze des Fahrverhaltens gesamt oder klassifiziert nach Fahrzeugklasse in das Netz eingespeist werden.

In dieser Studie kommt nur der Parametersatz *Innerorts* zum Einsatz, wobei die Auswahl der Parameter sowie der zulässige Wertebereich anhand bereits durchgeführter, sicherheitsbezogener Studien getroffen wurde. So haben Cunto und Saccomanno (2008) für ihre Studien Parameter des Folgeverhaltens, insbesondere von Wiedemann 99, und des Fahrstreifenwechselverhaltens ausgewählt. Weitere Analysen mit diesen Parametern im Zusammenhang mit SSAM Auswertungen sind Habtemichael und de Picado-Santos (2013) zuzuordnen, wogegen Miller (2009) sich mit Wiedemann 74 Parametern beschäftigt hat. Die letztendlich für diese Studie ausgewählten Parameter werden in Folge in Anlehnung an PTV (2016) kurz beschrieben, wobei Details zu den Wertebereichen dem Anhang 8.4 entnommen werden können.

ax (Mittlerer Stillstandsabstand) [m]:

Definiert die mittlere Wunschkonzanz zwischen zwei Fahrzeugen.

bxadd (Additiver Einfluss Sicherheitsabstand) [-]:

Wert für die Ermittlung des Wunschsicherheitsabstandes d. Ermöglicht die Anpassung von Zeitbedarfs-
werten.

bxmult (multiplikativer Einfluss Sicherheitsabstand) [-]:

Wert für die Ermittlung des Wunschsicherheitsabstandes d. Ermöglicht die Anpassung von Zeitbedarfs-
werten. Größerer Wert = größere Verteilung (Standardabweichung) des Sicherheitsabstands.

Aus diesen Parametern errechnet sich im Modell Wiedemann 74 der Wunschsicherheitsabstand fol-
gendermaßen:

$$d = ax + bx$$

$$bx = (bx_{add} + bx_{mult} + z) * \sqrt{v}$$

Die Variable z repräsentiert hierbei einen Wert aus dem Intervall zwischen 0 und 1, normalverteilt um
0,5 und mit einer Standardabweichung von 0,15.

CC0 (Stillstandsabstand) [m]:

Definiert den Wunsch-Stillstandsabstand zweier Fahrzeuge

CC1 (Folgeabstand) [s]:

Gibt den Abstand in Sekunden an, den ein Fahrer bei einer bestimmten Geschwindigkeit beibehalten
möchte. Gewählt wird hierbei eine Zeitverteilung, die empirisch oder normalverteilt sein kann und auf
deren Basis der Folgeabstand für ein Fahrzeug berechnet wird. Dies ist der Abstand in Sekunden, den
ein Fahrer bei einer bestimmten Geschwindigkeit beibehalten möchte. (PTV, 2017) Mit steigendem
Wert steigt die Vorsicht des Fahrers. Im Fahrzeugfolgemodell ist der Sicherheitsabstand definiert als
der minimale Abstand, mit dem ein Fahrer dem Vorderfahrzeug folgt. Bei hoher Auslastung bestimmt
dieser Wert maßgeblich die Kapazität. Bei einer vorgegebenen Geschwindigkeit errechnet sich der
mittlere Stillstandsabstand aus:

$$dx_{safe} = CC0 + CC1 * v$$

CC2 (Längs-Oszillation) [m]:

Beschränkt die Abstandsdifferenz, die ein Fahrer zum vorausfahrenden Fahrzeug zulässt, bevor er be-
wusst aufrückt.

CC3 (Wahrnehmungsschwelle für Folgen) [s]:

Definiert den Beginn des Verzögerungsvorgangs in Sekunden vor dem Erreichen des Sicherheitsabstan-
des. Zu diesem Zeitpunkt erkennt ein Fahrer ein langsames Vorderfahrzeug.

CC4/CC5 (pos./neg. Geschwindigkeitsdifferenz) [m/s]:

Definiert die positive/negative Geschwindigkeitsdifferenz während des Folgevorgangs. Niedrige Werte
führen zu einer empfindlicheren Reaktion von Fahrern auf die Beschleunigung oder Verzögerung des

vorausfahrenden Fahrzeugs. In der Regel werden diese beiden Parameter zusammen eingestellt und ihnen derselbe Wert mit unterschiedlichem Vorzeichen zugeordnet.

CC6 (Einfluss der Geschwindigkeit auf Oszillation) [1/(m*s)]:

Gibt den Einfluss des Abstandes auf die Oszillation der Geschwindigkeit während des Folgevorgangs an.

Wert 0: Die Oszillation ist unabhängig vom Abstand

Große Werte: Größere Oszillation der Geschwindigkeit mit zunehmendem Abstand

Der grafischen Ausführung des Wiedemann Folgemodells sind diese Parameter gemäß der Abbildung 75 zuzuordnen.

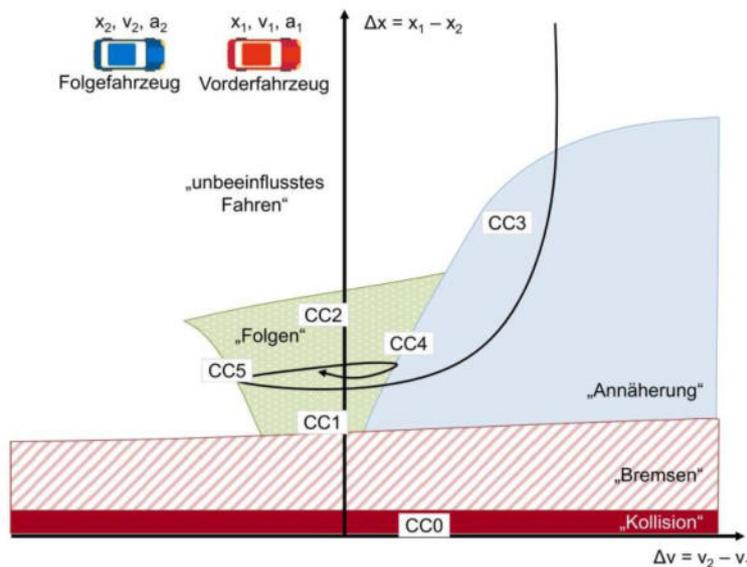


Abbildung 75: Folgeparameter nach Wiedemann 99 (Hoffmann, 2013)

Vorderfahrzeuge [#]:

Definiert die Anzahl der Vorderfahrzeuge oder Anzahl bestimmter Netzobjekte, die ein Fahrzeug nach vorne schauen kann, um auf Fahrzeuge vor oder auf derselben Strecke neben sich zu reagieren. Fahrzeuge berücksichtigen zusätzlich zur eingegebenen Anzahl der Vorderfahrzeuge die minimale und maximale Vorausschauweite.

Min. Nettoweglücke (Mindestweglücke) [m]:

Definiert den Mindestabstand, der nach einem Fahrstreifenwechsel zwischen zwei Fahrzeugen vorhanden sein muss, damit dieser erfolgen kann.

Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen [m/s²]:

Gibt an, wie stark das Folgefahrzeug A kooperativ bremst, um einem vorausfahrenden Fahrzeug B den Fahrstreifenwechsel in den eigenen Fahrstreifen zu ermöglichen. Wenn das Folgefahrzeug A erkennt,

dass es stärker bremsen müsste als dieser Wert angibt, falls das Vorderfahrzeug B zum Fahrstreifenwechsel ansetzen würde, wird das kooperative Bremsen abgebrochen oder nicht begonnen. Je höher der Wert, desto stärker wird gebremst und desto größer ist auch die Wahrscheinlichkeit für den Fahrstreifenwechsel. Das Vorderfahrzeug berücksichtigt bei seinem Fahrstreifenwechsel den Faktor für den reduzierten Sicherheitsabstand und die Parameter des Fahrzeugfolgemodells.

Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand [-]:

Dieser Faktor wird für jeden Fahrstreifenwechsel berücksichtigt und betrifft den Sicherheitsabstand des Folgefahrzeugs auf dem neuen Fahrstreifen für die Entscheidung, ob ein Fahrstreifenwechsel vollzogen wird, den eigenen Sicherheitsabstand des Fahrstreifenwechslers und den Abstand zum vorausfahrenden, langsameren Fahrstreifenwechsler. Während des Fahrstreifenwechsels reduziert VISSIM den Sicherheitsabstand auf den Wert, den die folgende Multiplikation ergibt: Ursprünglicher Sicherheitsabstand * Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand

Für jeden dieser Parameter wurden in etwa fünf verschiedene Einstellungen über die COM-Schnittstelle in VISSIM simuliert.

Die Analysen des Fahrverhaltens betreffen in erster Linie die Wiedemann Folgeparameter. Aus diesem Grund wird zunächst ein Vergleich zwischen den Defaulteinstellungen der beiden Ansätze abgehandelt. Durch die Umstellung auf das Wiedemann 99 Modell werden insgesamt 84 % mehr Konflikte erzeugt. Relativ gesehen ist bei den Lane-Change-Konflikten mit 172 % der höchste Anstieg zu verzeichnen, während die absolute Zunahme bei den Rear-End-Konflikten höher liegt. Crossing-Konflikte tragen mit einer Veränderung um 33 % zur Gesamtveränderung bei. Die Wahl des Wiedemann Modells spielt bezüglich der Verkehrssicherheit eine erhebliche Rolle. Der Anstieg der Lane-Change-Konflikte bestätigt die Aussage, dass Verflechtungsbereiche ein wesentliches Kriterium für die Modellauswahl sind.

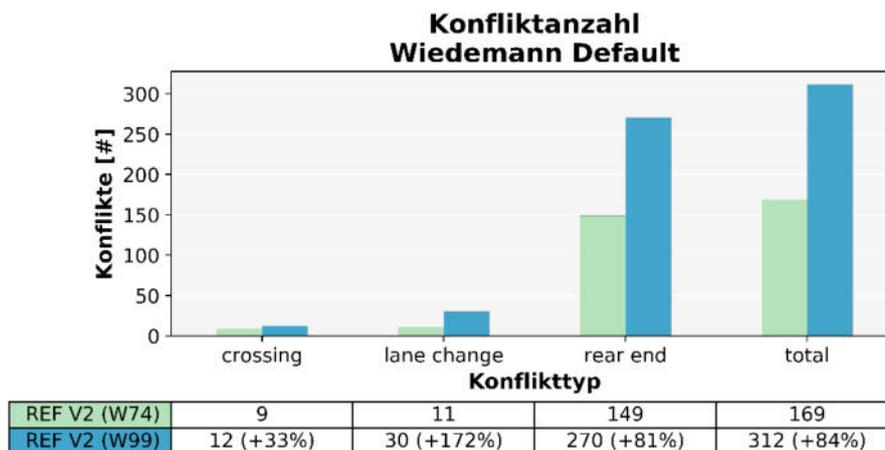


Abbildung 76: Defaultwerte Wiedemann 74 und Wiedemann 99 - Vergleich Konfliktanzahl

Die Unterschiede bezüglich der Konfliktkenngößen sind nur bei TTC auffallend. Bei Wiedemann 74 liegt der Wertebereich über 1,0, darunter treten nur noch Ausreißer auf. Hingegen liegt bei Wiedemann 99 das Minimum ohne Ausreißer bei 0,5 und das erste Quartil bei 1,0. Die Interquartilsabstände bei PET sind gleich groß und liegen im selben Wertebereich, wobei das erste Quartil bei Wiedemann 99 um 0,3 Sekunden niedriger liegt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der Wahl des Wiedemann 99 Modells nicht nur die Konfliktanzahl, sondern auch die Konfliktschwere steigt.

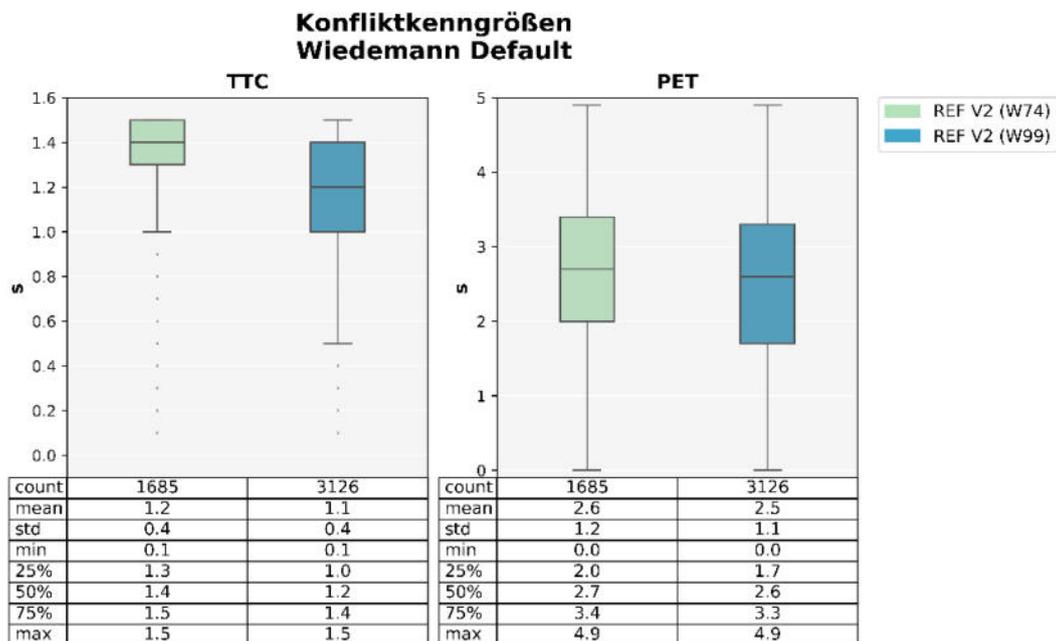


Abbildung 77: Defaultwerte Wiedemann 74 und Wiedemann 99 - Vergleich TTC und PET

Anhand des Szenarienvergleiches in Abbildung 78 bestätigt sich die Problematik der Verflechtungsbe-
reiche im Wiedemann 99 Modell. An den Knoten vergrößern sich nicht nur die Flächen auf denen
Konflikte stattfinden, sondern auch deren Dichte nimmt zu. Zusätzlich sind auch mehr Konflikte mit
einem TTC-Wert bis zu 1,0 zu verzeichnen. Am deutlichsten zeigt sich die Zunahme entlang der Berg-
mangasse und am Kaiser-Franz-Josef-Kai.

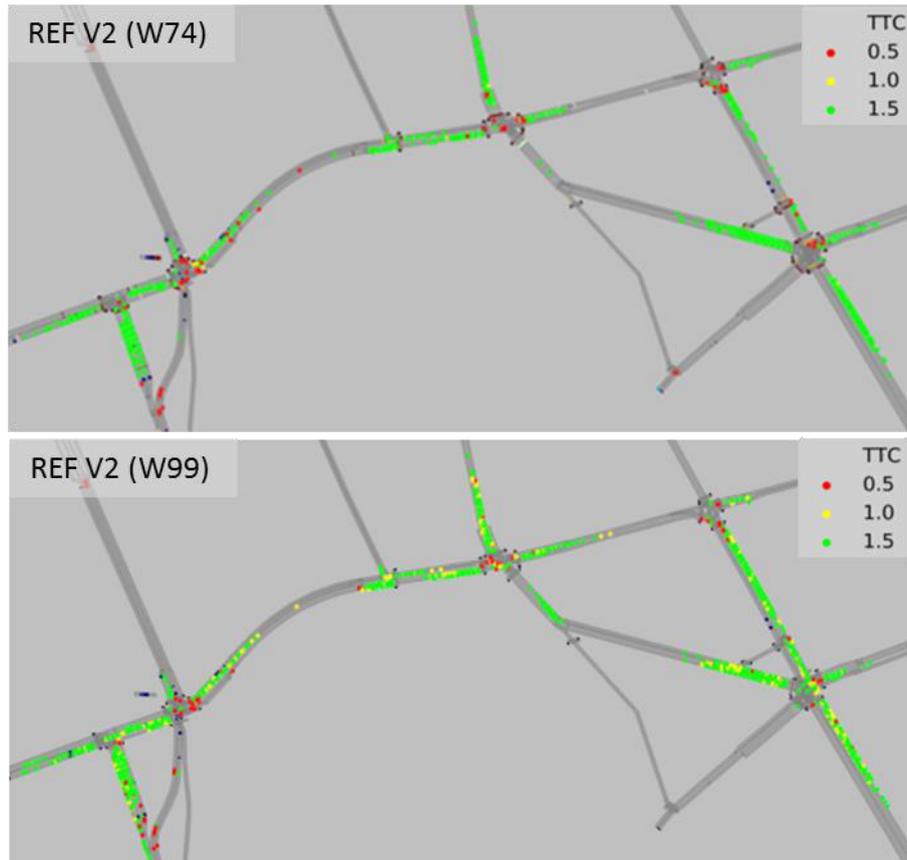


Abbildung 78: Defaultwerte Wiedemann 74 und Wiedemann 99 - Vergleich Konflikte im Netz

Für die weiteren Analysen werden an dieser Stelle nur die Ergebnisse der Parameter vorgestellt, bei denen sich Veränderungen von über 20 % in der Gesamtkonfliktanzahl ergeben. In Tabelle 14 sind die minimalen und maximalen Abweichungen der Konfliktanzahl ausgehend von den Ergebnissen der Defaulteinstellungen in Wiedemann 74 und 99 dargestellt. Die für die Detailauswertung herangezogenen Parameter sind grau hinterlegt und betreffen Wiedemann Folgeparameter aus beiden Modellen sowie die Anzahl der Vorderfahrzeuge. Die restlichen Auswertungen werden nicht im Detail behandelt, sind jedoch dem Anhang 8.1 beigelegt. Dazu gehören neben der Mehrheit der Wiedemann 99 Parameter, bei denen teilweise noch Veränderungen bis zu 9 % auftreten, die Parameter des lateralen Fahrverhaltens. In den für die Auswertung herangezogenen Grafiken sind die Defaulteinstellungen jeweils mit einem angehängten *D* gekennzeichnet und bei den Kenngrößenauswertungen dunkelgrau hinterlegt.

Tabelle 14: Abweichungen bezüglich Anzahl der Gesamtkonflikte

Parameter	Abweichung bezüglich Anzahl der Gesamtkonflikte in den Defaulteinstellungen			
	Minimum		Maximum	
	Absolut [#]	Relativ [%]	Absolut [#]	Relativ [%]
ax (Mittlerer Stillstandsabstand)	34	20	92	54
bxadd (Additiver Einfluss Sicherheitsabstand)	11	6	76	44
bmult (multiplikativer Einfluss Sicherheitsabstand)	6	3	68	40
CC0 (Stillstandabstand)	19	6	149	47
CC1 (Folgeabstand)	8	2	217	69
CC2 (Längs-Oszillation)	1	0	15	4
CC3 (Wahrnehmungsschwelle für Folgen)	14	4	30	9
CC4/CC5 (neg./pos. Geschwindigkeitsdifferenz)	1	0	13	4
CC6 (Einfluss der Geschwindigkeit auf Oszillation)	3	0	9	2
Vorderfahrzeuge	11	6	108	63
Min. Nettoweglücke	1	0	4	2
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	1	0	5	0
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	1	0	5	2

ax

Die Variation des Stillstandabstandes führt zu dem Ergebnis, dass tendenziell die Konflikte mit den höheren Werten abnehmen. Bei einem sehr niedrigen Stillstandsabstand von 0,5 Metern werden 54 % mehr Konflikte erzeugt, während ein Abstand von 3,0 Metern zu einer Reduktion von 46 % führt. Der stärkste Anstieg ist zwischen dem Default- und dem nächst höheren Wert zu verzeichnen, wobei der Verlauf der Gesamtergebnisse auf die Rear-End-Konflikte zurückzuführen ist. Crossing-Konflikte verändern sich anhand der Parametrierung nur bei einem sehr geringen Sicherheitsabstand. Die Anzahl der Lane-Change-Konflikte stagniert ab dem Defaultwert. Dies ist insofern ein schlüssiges Ergebnis, da die Abstände zwischen den Fahrzeugen eine wesentliche Größe zur Ermittlung von Konflikten darstellen. Je größer diese sind, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Konflikt zustande kommt.

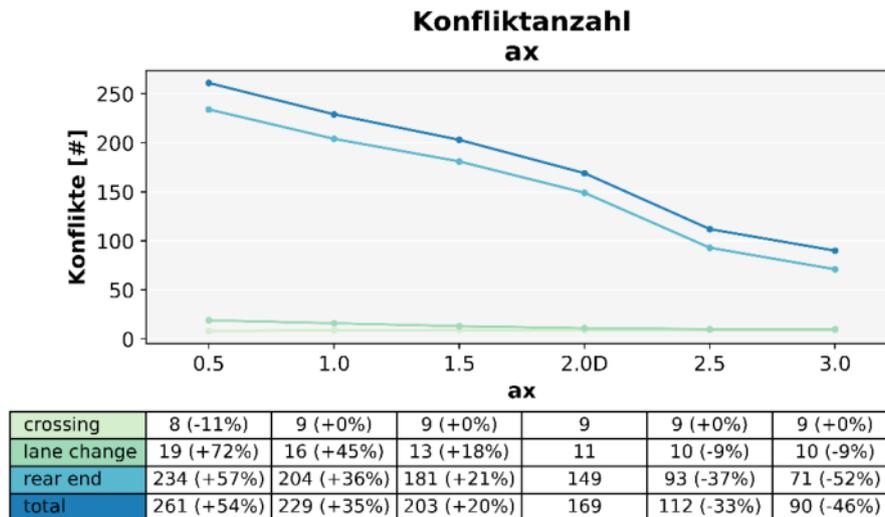


Abbildung 79: ax - Vergleich Konfliktanzahl

Durch die Parametervariation von ax differenzieren sich bei TTC zwei Cluster. So haben Einstellungen bis zum Defaultwert zur Folge, dass die Spannweite und der Interquartilsabstand sich verringern. Hin-gegen ist ab dem Defaultwert ein konstanter Wertebereich mit sich vergrößernden Interquartilsabstand zugunsten niedriger TTC-Werte zu beobachten. Die geringsten Werte treten bei kleinstem und größtem Stillstandsabstand auf, bei denen sich die Minimalwerte bei 0,1 bewegen und das 25 % Quantil bei 0,8 bzw. 0,9 Sekunden liegt. Dazwischen steigen die Minimalwerte über 0,6 Sekunden. Die Lage der Interquartilsabstände von PET steigen mit einem zunehmenden Parameterwert, während sich deren Größe erst ab dem Defaultwert ändert. Außerdem ist ein Anstieg der Mediane zu verzeichnen, der bei 0,5 Metern bei 1,5 Sekunden und bei 3 Metern bei 1,9 Sekunden liegt. Ein geringer Stillstandsabstand hat somit nicht nur mehr, sondern auch schwerere Konflikte zur Folge. Bei Stillstandsabständen über dem Defaultwert verringern sich zwar die Konflikte, allerdings nimmt die Konfliktschwere zu.

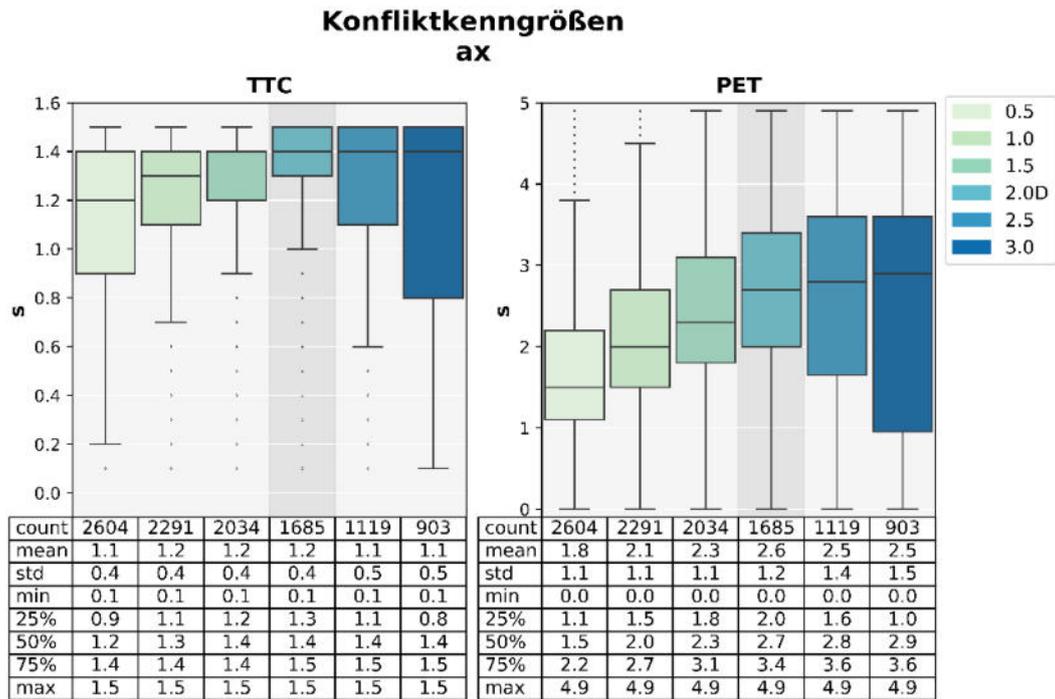


Abbildung 80: ax - Vergleich TTC und PET

bxadd

Mit einer Erhöhung des additiven Anteils von bx ist zunächst eine Absenkung der Konflikte zu beobachten, die um den Defaultwert stagniert und bei einem Wert von 3,0 in einer Steigung endet. Die größte Abweichung von dem Defaultwert liegt bei 44 %, bei Lane-Change-Konflikten ergeben sich sogar 90 % Abweichung.

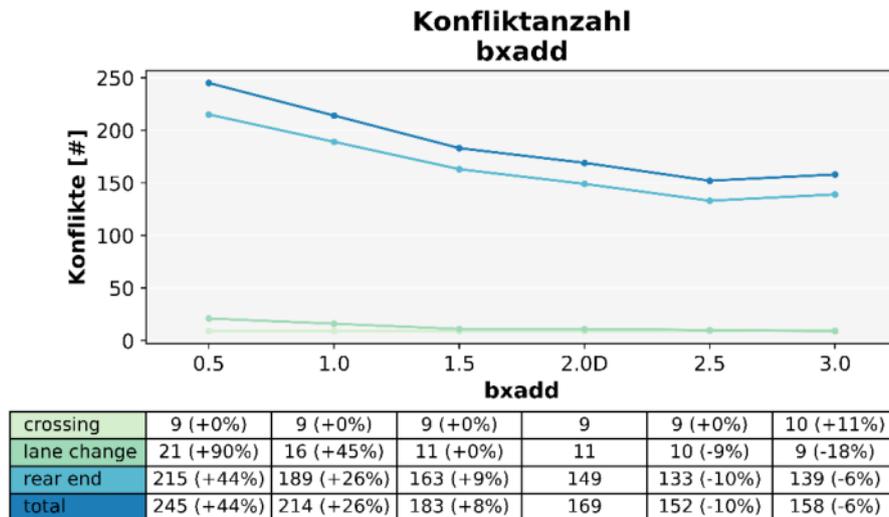


Abbildung 81: bxadd - Vergleich Konfliktanzahl

Die Lageparameter von TTC variieren nur bei Werten bis 1,0. Dabei ergeben sich Minimalwerte ohne Ausreißer von 0,8 Sekunden. Bei einem bxadd von 0,5 liegt auch der Median im Gegensatz zu den anderen Einstellungen bei 1,3 Sekunden. Die Größe der Interquartilsabstände von PET bleibt aufgrund der Parametervariation annähernd unverändert, allerdings steigen die Quartile mit höherem bxadd und gleichen sich ab dem Defaultwert an. Der Einfluss auf die Konfliktschwere ist bei bxadd nicht so deutlich wie bei ax, jedoch ist auch hier ersichtlich, dass bei niedrigen Werten die Konfliktschwere zunimmt.

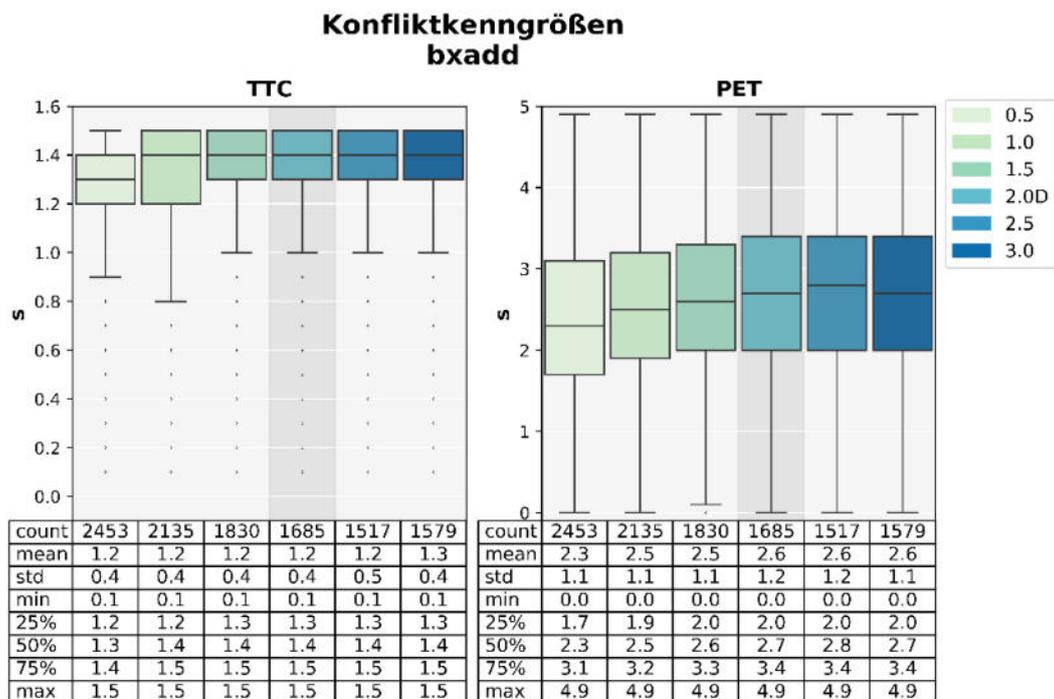


Abbildung 82: bxadd - Vergleich TTC und PET

bxmult

Von den Wiedemann 74 Parametern sind die geringsten Änderungen der Konflikanzahl bei bxmult zu beobachten. Maximale Abweichungen ergeben sich auch hier wieder bei 0,5 mit 40 %, während im Gegenzug zu bxadd die Anzahl bei der höchsten Parametereinstellung nicht ansteigt.

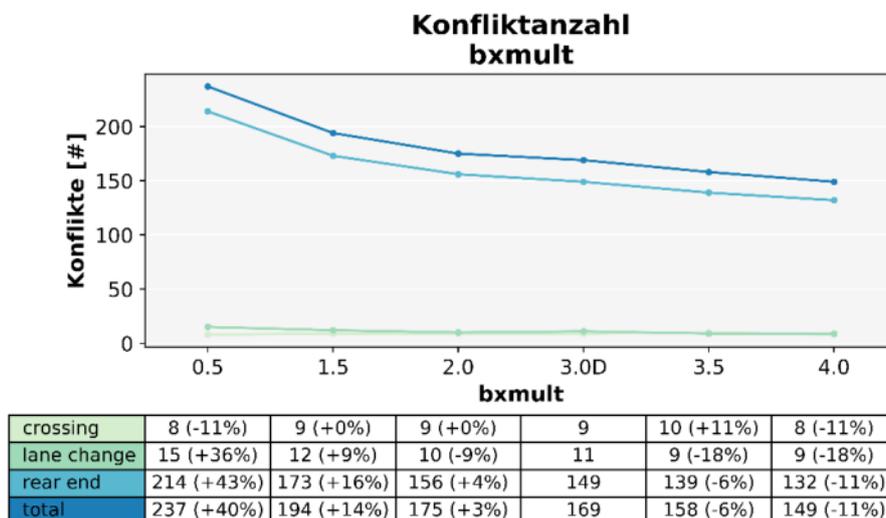


Abbildung 83: bxmult - Vergleich Konfliktanzahl

Durch die Variation von bxmult ergeben sich die gleichen TTC Verteilungen wie bereits bei bxadd. Bei PET hingegen verändern sich die Lageparameter im Unterschied zu den Ergebnissen von bxadd kaum. Die Interquartilsabstände liegen im mittleren Wertebereich von PET zwischen 1,9 und 3, 5 Sekunden.

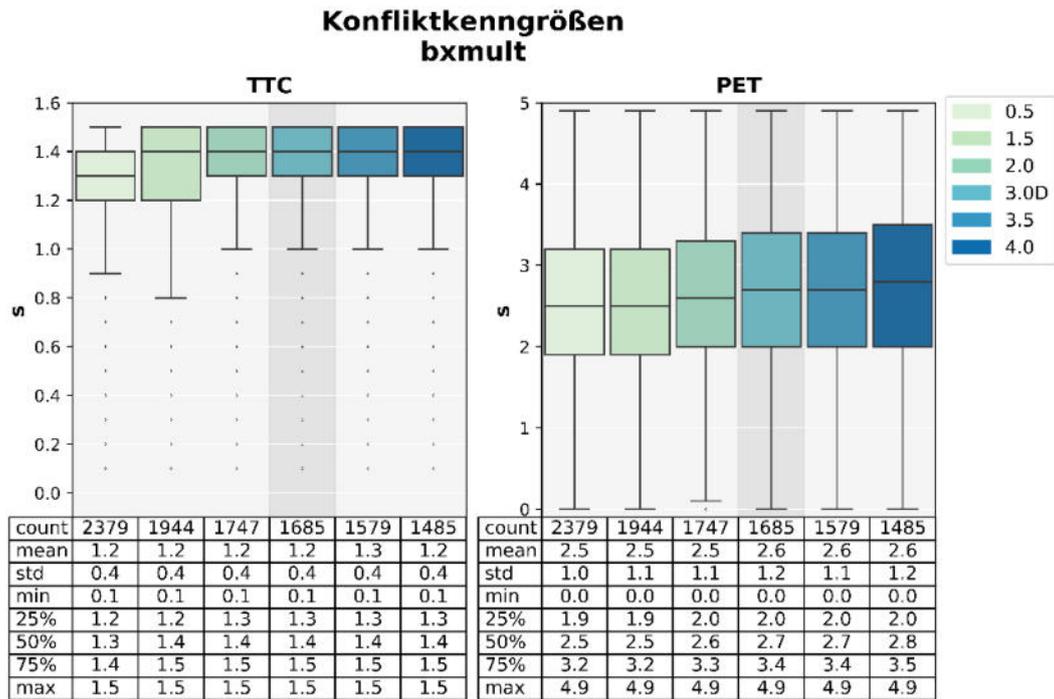


Abbildung 84: bxmult - Vergleich TTC und PET

CC0

Der Parameter CC0 kann als Pendant zu ax gesehen werden, da er ebenfalls den Stillstandsabstand angibt, auch wenn der Defaultwert mit 1,5 Metern niedriger liegt. Außerdem ist hier zu beachten, dass die Konflikanzahl durch den Wechsel auf Wiedemann 99 deutlich höher liegt als bei ax. Die größte Abweichung ergibt sich bei 0,5 Metern, wobei die Lane-Change-Konflikte relativ gesehen am meisten zunehmen. Starke Veränderungen sind hier auch in höheren Parametereinstellungen zu verzeichnen, die um die 30 % liegen.

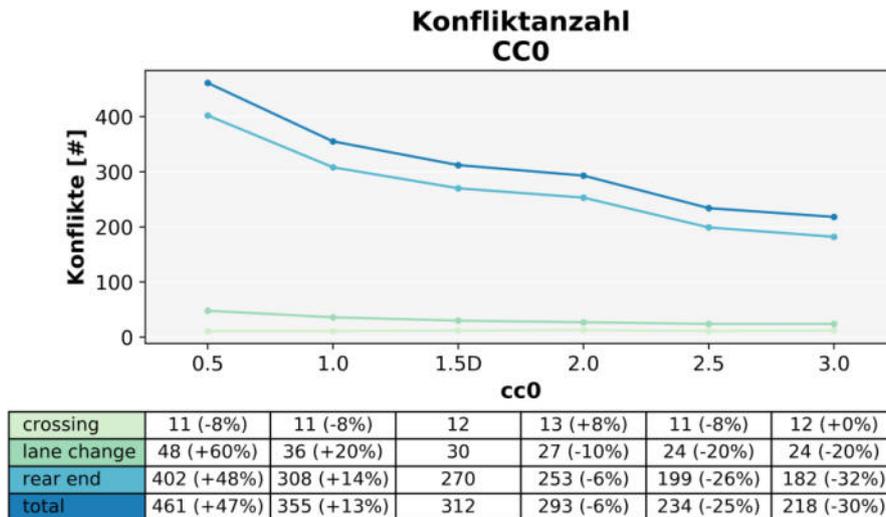


Abbildung 85: CC0 - Vergleich Konfliktanzahl

Die Auswirkungen von CC0 auf TTC sind deutlich geringer als bei ax. Die Interquartilsabstände sind nahezu ident, wobei ein CC0 von 0,5 mit einem 25 % Quantil von 0,9 sich aus diesen Ergebnissen abhebt. Die Interquartilsabstände von PET verschieben sich mit zunehmendem Stillstandsabstand nach oben und gleichen sich über dem Defaultwert an. Die Zeitabstände zwischen Fahrzeugen auf der Konfliktfläche steigen mit zunehmenden Stillstandsabstand.

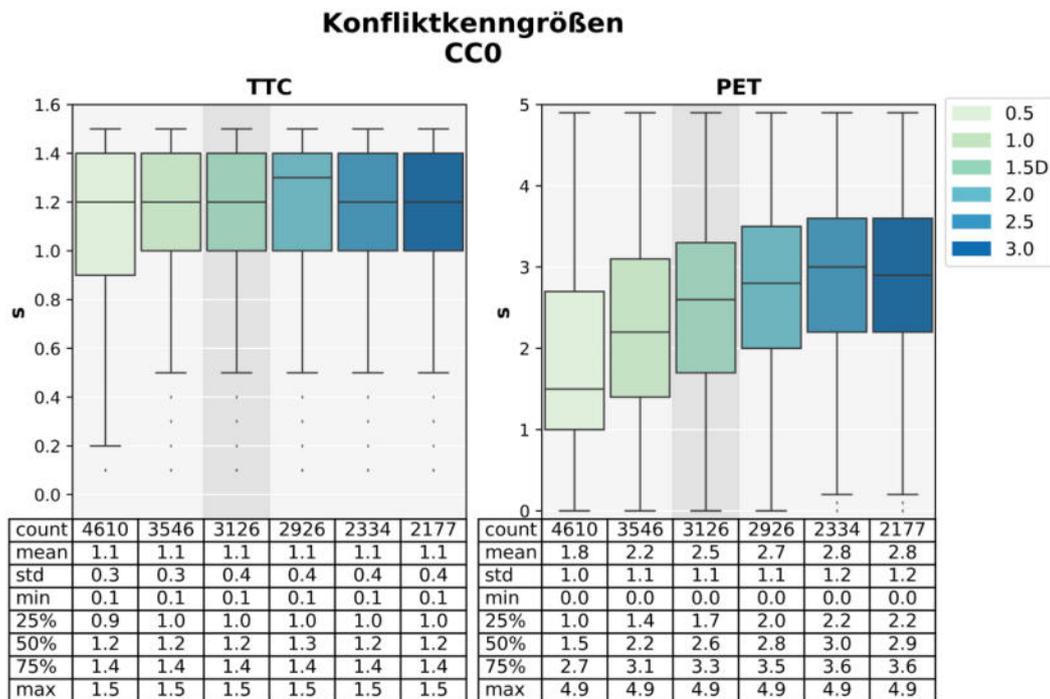


Abbildung 86: CC0 - Vergleich TTC und PET

CC1

Über CC1 wird der der Folgeabstand geschwindigkeitsabhängig bestimmt, wobei die hier vorliegenden Parametereinstellungen den Mittelwert der gewählten Zeitverteilung darstellen. Wie bereits bei bxxd

steigen die Konflikte mit zunehmenden Wert wieder, allerdings in einem größeren Ausmaß. Prinzipiell nimmt aber mit der Erhöhung des Sicherheitsabstandes auch die Vorsicht des Fahrers zu und sollte folglich in einer Reduktion der Konflikte resultieren. Hier kann die Überlegung angestellt werden, dass die Manipulation von CC1 ohne entsprechende Anpassung weiterer Folgeparameter eventuell mehr Konflikte hervorruft. Da es sich bei bxadd und bei CC1 in beiden Fällen um geschwindigkeitsabhängige Parameter handelt, können diesbezügliche Verteilungen eine Erklärung dieser Ergebnisse liefern.

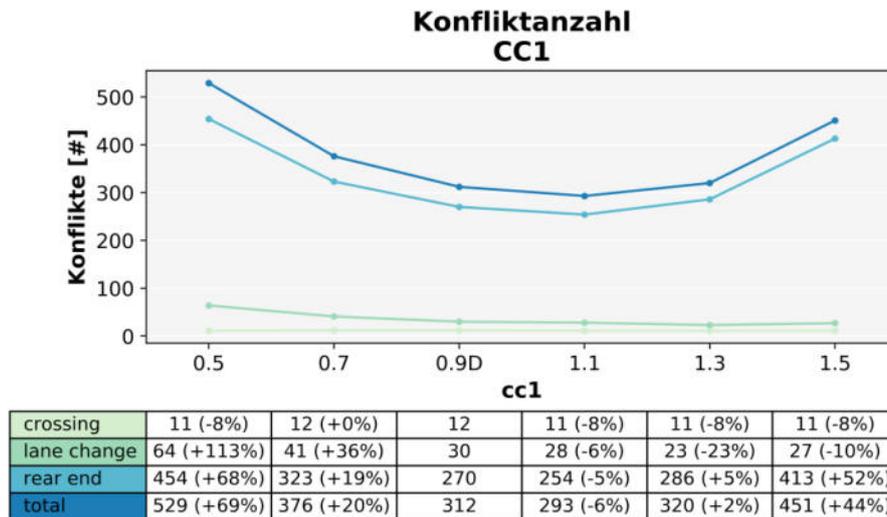


Abbildung 87: CC1 - Vergleich Konfliktanzahl

Die Verteilungen von TTC sind sehr heterogen. Ein CC1 von 0,5 und 0,9 führt zu einem Wertebereich zwischen 0,5 und 1,5 Sekunden. Die Interquartilsabstände der anderen CC1 Einstellungen sind in ihrer Größe gleich, jedoch hebt sich die höchste Parametereinstellung von den anderen ab. PET zeigt einen kurvenförmigen Verlauf, bei dem der Median bis zum Default Wert zu- und danach wieder abnimmt.

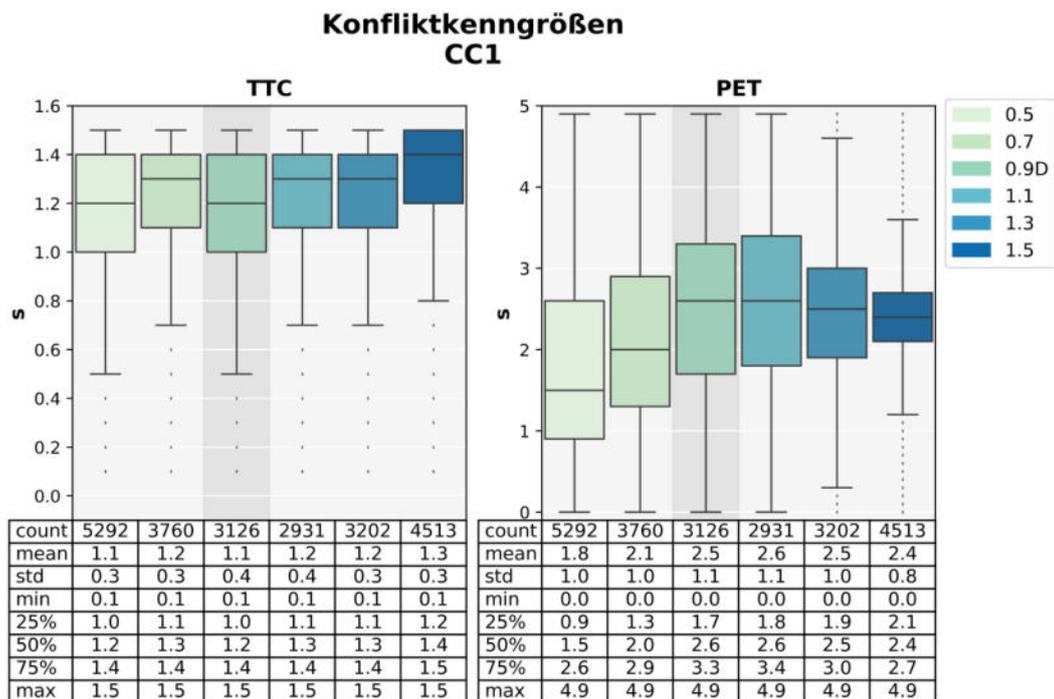


Abbildung 88: CC1 - Vergleich TTC und PET

Vorderfahrzeuge

Dieser Parameter gibt an, wie viele Fahrzeuge und Netzobjekte vorausschauend von der FFE berücksichtigt werden und steht mit dem Folgeparameter der Vorausschauweite in direktem Zusammenhang. Die Anzahl der Vorderfahrzeuge beeinflusst somit auch die Sichtweite mit und ist der einzige Parameter, der nicht dem Wiedemann Modell zuzuordnen ist und sich aber deutliche Veränderungen ergeben haben. Aus den hier dargelegten Ergebnissen geht hervor, dass mit zunehmender Voraussicht sich die Konflikte reduzieren. Können Fahrer nur ein Vorderfahrzeug wahrnehmen, so steigen die Konflikte insgesamt um 63 %. Die stärkste relative Änderung ist hierbei bei den Lane-Change-Konflikten zu verzeichnen, wohingegen in absoluten Werten die Rear-End-Konflikte den meisten Zuwachs aufweisen.

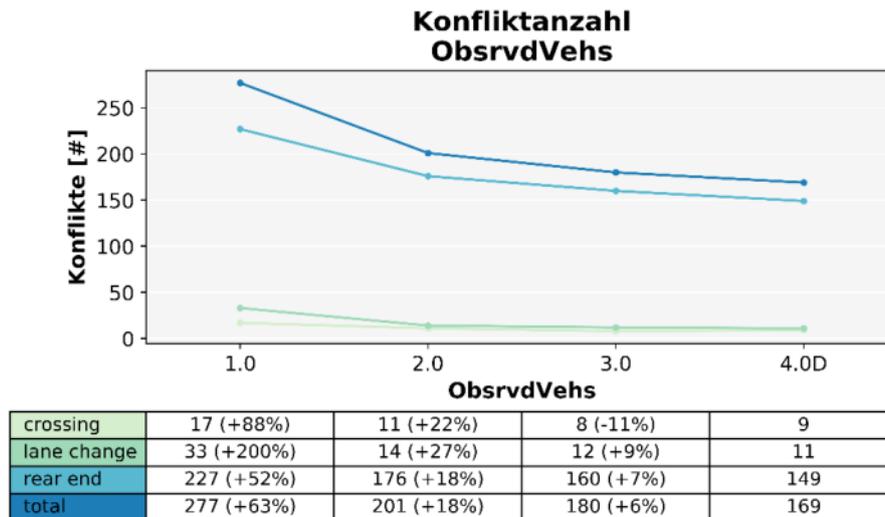


Abbildung 89: ObsrvdVehs - Vergleich Konfliktanzahl

Bei den Konfliktkenngrößen ist wie bei der Anzahl die größte Veränderung bei den beiden niedrigsten Parametereinstellungen zu beobachten, da der Wertebereich bei TTC niedriger liegt und der Interquartilsabstand größer ist. Insgesamt betrachtet sind aber die Veränderungen hier minimal, da die einzelnen Lageparameter sich kaum unterscheiden. Ein ähnliches Ergebnis ist bezüglich PET zu erkennen. Die Schwankungen, die sich hier ergeben sind so gering, dass sie vielmehr auf andere Fahrzeugkonstellationen als auf die Parametervariation zurückzuführen sind.

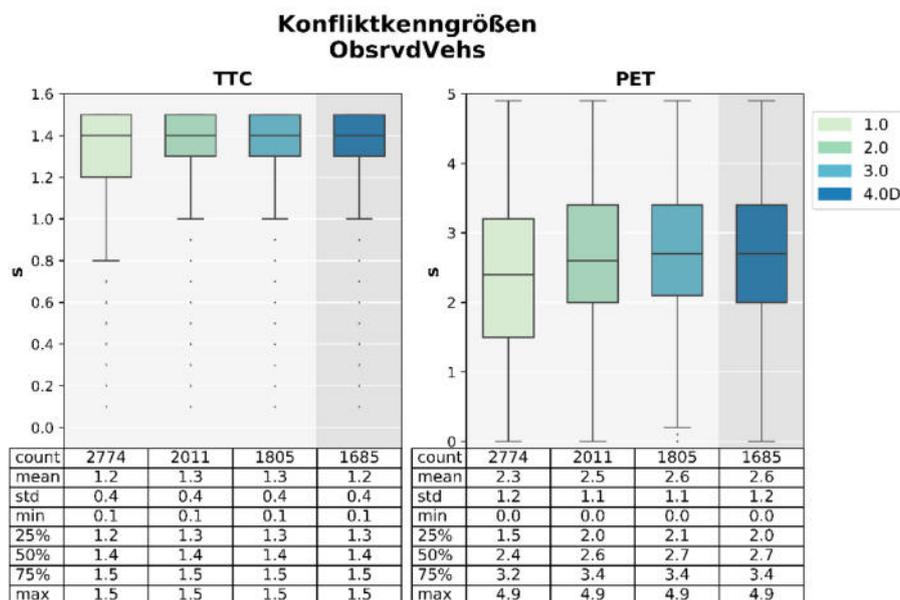


Abbildung 90: ObsrvdVehs - Vergleich TTC und PET

Die Variation von Fahrverhaltensparametern wirkt sich nur in eingeschränktem Maße auf die Generierung von Konflikten aus. Von den 13 getesteten Parametern weisen nur 6 nennenswerte Unterschiede in den Ergebnissen auf, die vorrangig die Folgeabstände der beiden Wiedemann Modelle umfassen. Tendenziell nehmen die Konflikte mit zunehmenden Parametereinstellungen ab. Ausnahmen bilden lediglich CC1 und bxadd, bei denen die Konflikte wieder zu steigen beginnen. Für eine Erklärung dieses

Zusammenhang können an dieser Stelle nur Vermutungen angestellt werden und sind zusätzliche Detailstudien notwendig. Auch wenn die einzelnen Parametervariationen wenig Einfluss haben, so spielt die Wahl des Folgemodells eine wesentliche Rolle in der Generierung von Konflikten. Insgesamt zeigen diese Ergebnisse, dass nur wenige Fahrverhaltensparameter einen ausschlaggebenden Beitrag zur Kalibrierung der Verkehrssicherheit beitragen können. Die Auswahl der Parameter beruht auf zuvor durchgeführten Studien, beispielsweise von Habtemichael und de Picado-Santos (2013), in denen in einigen Fällen eine signifikante Auswirkung der Parametervariation festgestellt werden konnte, die sich hier jedoch nicht ergeben hat. Aus diesem Grund ist die Übertragbarkeit der Fahrverhaltensparametervariationen auf andere Modelle für verkehrssicherheitsspezifische Fragestellungen zu hinterfragen.

5.1.2 Fahrradverkehr (REF V3 RF)

Die Analysen des REF V3 haben gezeigt, dass der Fahrradverkehr noch zu ungenau modelliert ist um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Aus diesem Grund wurden einige Maßnahmen zur verbesserten Darstellung des Fahrradverkehrs durchgeführt. Zunächst wurden anhand einer weiteren Zählung am Knotenpunkt Neubaugasse/Keplerstraße im Dezember 2018 die Zuflüsse und Routen revidiert. Es ergab sich ein weit höherer Anteil an Überquerungen in der Neubaugasse, wobei die Messung nicht richtungsbezogen durchgeführt wurde und folglich die angepassten Werte nur abgeschätzt werden konnten. Dafür wurde ein Teil des Zuflusses der Keplerstraße auf die nördliche Neubaugasse übertragen. Auf der Keplerbrücke hingegen wurden die Werte belassen, da diese aus dort durchgeführten Querschnittsmessungen der Stadt Graz stammen.

Tabelle 15: Zuflüsse Fahrradverkehr

Fahrradverkehr [Fzg/h]		
	REF V3	REF V3 RF
Zufluss Keplerbrücke	120	120
Zufluss Keplerstraße	180	150
Zufluss Neubaugasse N	5	80
Zufluss Neubaugasse S	5	5

Zusätzlich wurde bei den Routenentscheidungen auf der Ost-West-Achse ein höherer Anteil in die Neubaugasse Richtung Norden geführt. Der Zufluss in der Neubaugasse Nord teilt sich nun zu 56 % in Richtung Osten sowie 38 % in Richtung Westen und zu einem geringen Anteil in Richtung Süden. Die vollständigen Routenentscheidungen sind in Tabelle 16 aufgelistet.

Tabelle 16: Routenentscheidung Fahrradverkehr REF V3 RF

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahrzeugrouten (Nr)	Ende Strecke Name (Nr)	REF V3	REF V3 RF
Radverkehr W_O (154)	14-1	Keplerbrücke (168)	175 (97%)	135 (90%)
	14-2	Neubaugasse (143)	3 (2%)	5 (3%)
	14-3	Neubaugasse RF (158)	2 (1%)	10 (7%)
		Summe	180 (100%)	150 (100%)
Radverkehr O_W (153)	15-1	Keplerstraße (150)	115 (96%)	105 (88%)
	15-2	Neubaugasse (143)	3 (3%)	5 (4%)
	15-3	Neubaugasse RF (158)	2 (2%)	10 (8%)
		Summe	120 (100%)	120 (100%)
Radverkehr N_S (159)	16-1	Keplerstraße (150)	2 (40%)	30 (38%)
	16-2	Keplerbrücke (168)	2 (40%)	45 (56%)
	16-3	Neubaugasse (143)	1 (20%)	5 (6%)
		Summe	5 (100%)	80 (100%)

Der zweite Schwerpunkt der Radverkehrsadaptierung ist das Fahrverhalten, das Wunschgeschwindigkeiten und Folgeverhalten umfasst. Anhand einer für den Fahrradverkehr konzipierten Wunschgeschwindigkeitsverteilung aus Hebenstreit und Fellendorf (2018) wurde diese im Modell angepasst. Dabei wurde von einer Normalverteilung der Wunschgeschwindigkeit für normale Fahrräder mit einem Mittelwert (μ) von 17,7 km/h und einer Standardabweichung (σ) von 3,3 km/h ausgegangen. Der Wertebereich, der 95 % abdeckt, geht somit von 11,1 km/h bis 24,3 km/h. Für die Nord-Süd-Achse wurde dieser Bereich herangezogen, hingegen wurde für die Ost-West-Achse die Verteilung adaptiert. Der Grund dafür liegt in der leichten Steigung entlang der Keplerstraße in Richtung Osten, die sich auf die Geschwindigkeiten auswirkt. Ausgehend von der Überlegung, dass anhand dieser Steigung die Geschwindigkeiten nach Osten geringer ausfallen, wurde der Maximalwert um ein σ reduziert. Im Gegenzug dazu wurde in Richtung Westen der Wertebereich um ein σ höher angesetzt und die Zwischenpunkte beider Verteilungen entsprechend angepasst. Daraus ergeben sich insgesamt drei Verteilungen, die für die Wunschgeschwindigkeit im Fahrradverkehr zum Einsatz kommen.

Tabelle 17: Wunschgeschwindigkeit Fahrrad

	Mittelwert	Untere Grenze		Obere Grenze	
N-S S-N	17,7	11,1	$(\mu-2\sigma)$	24,3	$(\mu+2\sigma)$
W-O	17,7	11,1	$(\mu-2\sigma)$	21	$(\mu+\sigma)$
O-W	17,7	14,4	$(\mu-\sigma)$	24,3	$(\mu+2\sigma)$

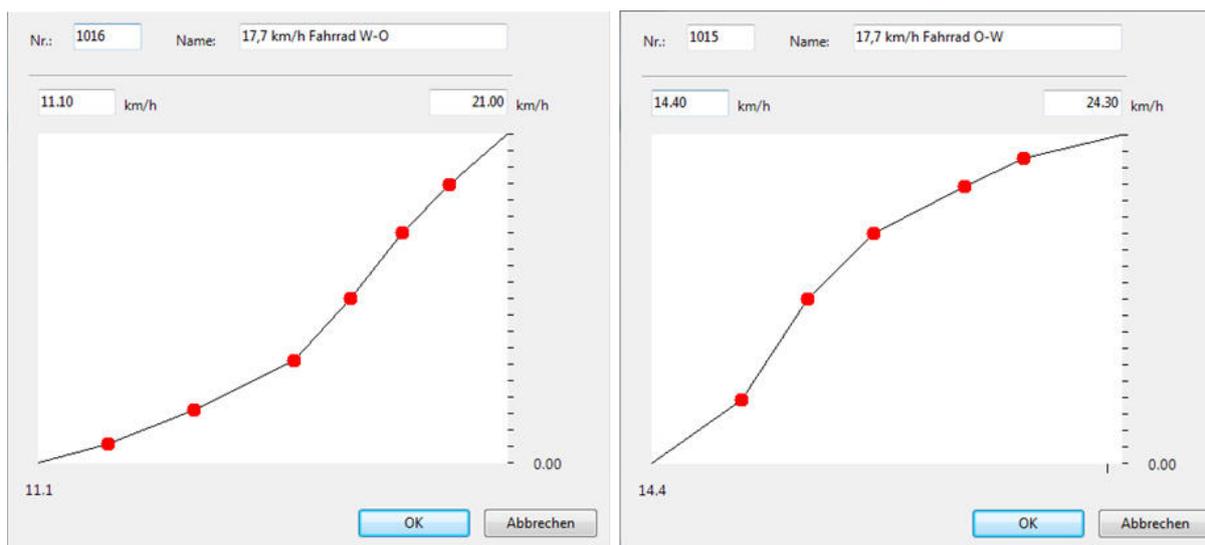


Abbildung 91: Wunschgeschwindigkeit Fahrrad unter der Berücksichtigung der Steigung

Ein weiterer wesentlicher Aspekt bezüglich Fahrverhalten waren die Folgeparameter. In den Default-einstellungen ist zwar ein eigener Fahrverhaltensparametersatz für Fahrradfahrer definiert, allerdings ist dieser dem des motorisierten Verkehrs sehr ähnlich. Tørslev und Albrink (2013) haben sich in ihrer Studie mit der mikroskopischen Modellierung des Fahrradverkehrs auseinandergesetzt und dabei im Zuge der Kalibrierung einen speziellen Parametersatz für den Fahrradverkehr entwickelt. Begründet werden diese Anpassungen durch die Tatsache, dass Geschwindigkeiten und Beschleunigungsvermögen deutlich geringere Werte aufweisen. Außerdem ist die Bereitschaft und Notwendigkeit, die Geschwindigkeit an das Vorderfahrzeug anzupassen nicht so stark ausgeprägt wie im motorisierten Verkehr, wodurch sich die Oszillationsparameter verringern. In Tabelle 18 sind die Fahrradfolgeparameter in den Defaulteinstellungen des Szenarios REF V3 den neuen Werten in REF V3 RF gegenübergestellt.

Tabelle 18: Folgeparameter Fahrradverkehr

	REF V3	REF V3 RF	Einheit
CC0	0,5	0,2	[m]
CC2	0	2	[s]
CC3	-8	-20	[s]
CC4	-0,35	-0,25	[m/s]
CC5	0,35	0,25	[m/s]
CC6	11,44	1	[1/m*s]
CC7	0,25	0,2	[m/s ²]
CC8	3,5	1,8	[m/s ²]
CC9	1,5	0,01	[m/s ²]
Vorausschauweite (Min)	10	20	[m]
Vorderfahrzeuge	2	10	[#]
Zurückschauweite (Min)	0	20	[m]

Neben dem Fahrradverkehr wurde in diesem Szenario auch eine Fußgängerüberquerung hinzugefügt, die ebenfalls der VLSA 507 untergeordnet ist. Die Zuflüsse wurden anhand der Zählung mit jeweils 46 Fußgängern pro Richtung belegt. Diese Modellierungsschritte sind zwar hier nicht relevant, dienen aber als Grundlage für das Szenario des nicht regelkonformen Verhaltens, das in Abschnitt 5.1.3 behandelt wird.

In den hier vorliegenden Ergebnissen werden nur reine Radverkehrskonflikte betrachtet und alle anderen Modi aus dem Datensatz über die Fahrzeuglänge herausgefiltert. Die Reduktion der Rear-End-Konflikte um 79 % bestätigen die Überlegung, dass der Großteil der Konflikte aus einem ungenau modelliertes Fahrverhalten resultieren. Die leichte Zunahme der Crossing-Konflikte kann auf die veränderte Routenlegung zurückgeführt werden, durch die sich im Szenario REF V3 RF deutlich mehr kreuzende Trajektorien ergeben.

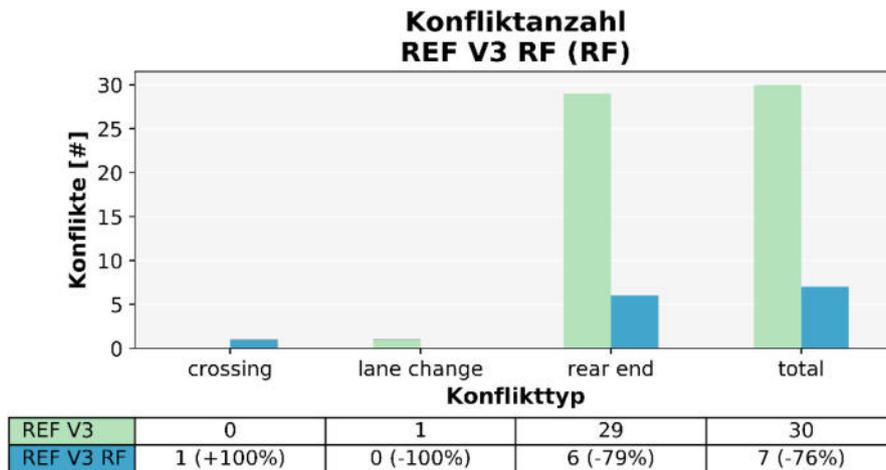


Abbildung 92: REF V3 RF - Vergleich Konfliktanzahl

Durch die Maßnahmen im Fahrradverkehr haben sich zwar die Konflikte reduziert, allerdings liegen nun die TTC-Werte deutlich niedriger. Gesunken sind dabei nicht nur die Lageparameter, sondern auch der Minimalwert. Bei PET hingegen verlagert sich die Verteilung nach oben. Da es sich hier vorrangig um Rear-End-Konflikte handelt, so deutet dieses Ergebnis daraufhin, dass sich die Folgeabstände durch die Parameteradaptierung vergrößert haben. Zudem ist es auch möglich, dass die abgesenkten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen das Einhalten des Sicherheitsabstandes erleichtert haben.

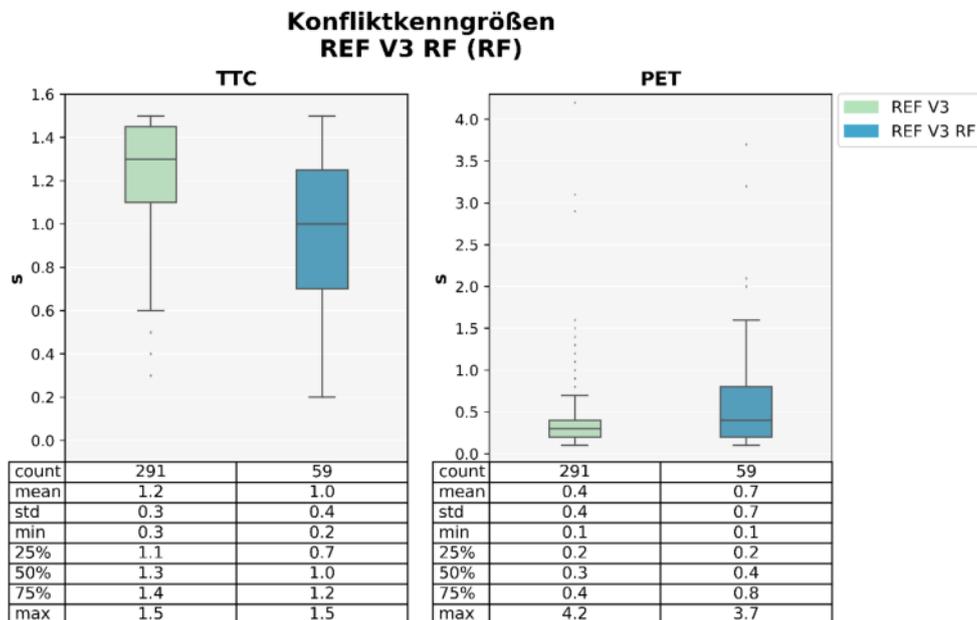


Abbildung 93: REF V3 RF - Vergleich TTC und PET

Besonders deutlich sind die Auswirkungen der Adaptierungen im Netzvergleich in Abbildung 94 zu sehen. Die Konflikte verteilen sich im links dargestellten Szenario REF V3 über die gesamte Strecke, während sie sich rechts im Szenario REF V3 RF vollkommen aufgelöst haben und nur noch an den Knotenpunkten auftreten. Diese Verortung kommt damit der Verteilung von Konflikten des motorisierten Verkehrs nahe, deren Häufungspunkte vorrangig in den Wartebereichen an den Knoten vorkommen.

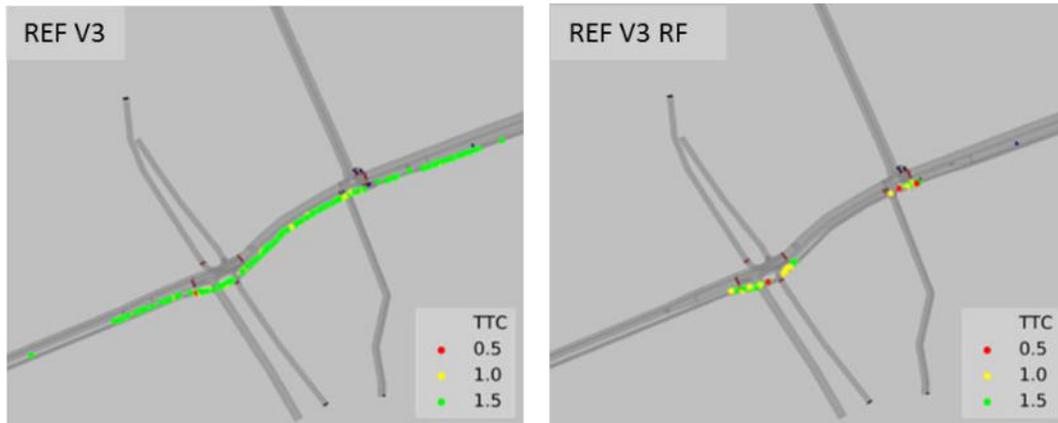


Abbildung 94: REF V3 RF - Vergleich Konflikte im Netz

Im Gegensatz zum motorisierten Verkehr haben Fahrverhaltensparameter einen wesentlichen Einfluss auf den Fahrradverkehr. Auch können die Ergebnisse hier auf die Anpassung der Wunschgeschwindigkeit zurückgeführt werden, die im Ausgangsszenario zu hoch modelliert wurde. Hierbei ist zu beachten, dass die Steigung der Strecke die Geschwindigkeit stärker beeinflussen kann als es im motorisierten Verkehr der Fall ist. Werden diese Aspekte in Verkehrssicherheitsanalysen berücksichtigt, so kann die Variation dieser Parameter einen wesentlichen Beitrag zur Kalibrierung beitragen.

5.1.3 Nicht regelkonformes Verhalten (REF V3 NRKV)

Einen wesentlichen Einfluss auf Konflikte hat nicht regelkonformes Verhalten, durch das laut Statistik Austria (2019) im Ortsgebiet über 90% der Unfälle im Jahr 2018 verursacht wurden. Davon gehen 37,7 % auf Unachtsamkeit sowie 27,1 % auf Vorrangverletzungen und Rotlichtmissachtung zurück. Diese beiden Ausprägungen nehmen damit die Spitzenposition der Unfallursachen im Ortsgebiet ein und sind damit als durchaus relevante Aspekte in der Konfliktanalyse zu erachten.

Im Rahmen der Zählung an der Neubaugasse wurden auch Rotlichtmissachtungen erfasst, allerdings nur von Fußgängern und Radfahrern. Über den Befolgungsgrad wurden im Szenario REF V3 RF die Anteile der Rotlichtmissachtungen für Fußgänger mit 2,2 % und für Radfahrer mit 8,4 % den Signalgebern in der Neubaugasse übergeben.

Tabelle 19: Rotlichtmissachtung

	Zählung		Rotlichtmissachtung
	Grün	Rot	
Radfahrer	95	8	8,4 %
Fußgänger	91	2	2,2 %

Die Unaufmerksamkeit wird über die Folgeverhaltensparameter eingestellt, wobei die Dauer und die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten variiert werden kann. Richtwerte dafür wurden vom Wisconsin Department of Transportation (2018) herangezogen, das eine Empfehlung für Fahrverhaltensparameterinstellungen verfasst hat. Für die Unaufmerksamkeit wurde darin der zulässige Wertebereich für die Dauer bis zu einer Minute mit einer Wahrscheinlichkeit von maximal 5 % vorgeschlagen. In der vorliegenden Studie wurden 0,5 Sekunden mit 2,5 % Wahrscheinlichkeit für den Fahrverhaltensparametersatz *Innerorts* gewählt.

Da die Einstellungen bezüglich Unaufmerksamkeit nur den motorisierten Verkehr betreffen, wurde dieser für die Konfliktauswertung herangezogen. Zwar beziehen sich die Rotlichtmissachtungen auf den Fahrrad- und Fußgängerverkehr, allerdings stehen hierbei trotzdem die Auswirkungen auf den motorisierten Verkehr im Vordergrund. Es lässt sich eine Steigerung um 22 % der Rear-End-Konflikte beobachten, die durch die modellierte Unaufmerksamkeit verursacht wurde. Eine minimale Reduktion der Konflikte ist bei den anderen beiden Typen zu erkennen, wobei diese mehr auf die Randomisierung zurückgeführt werden kann als auf eine klare Ursache-Wirkung-Beziehung der Parametereinstellungen.

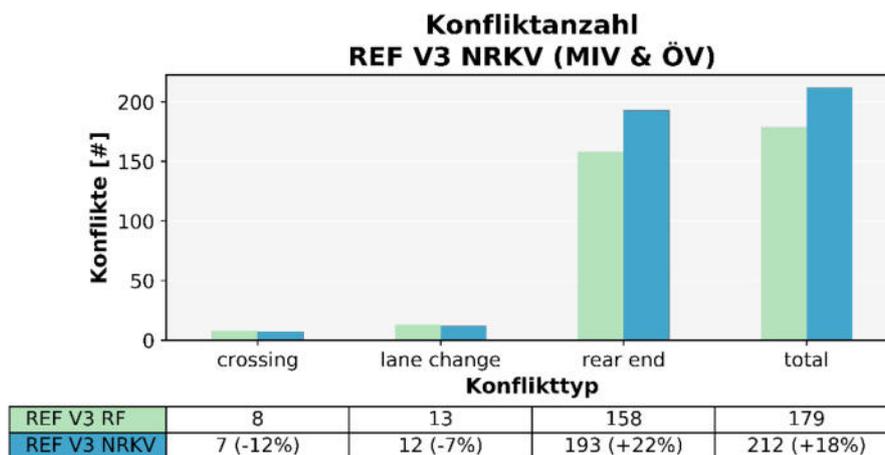


Abbildung 95: REF V3 NRKV - Vergleich Konfliktanzahl

Sehr gering fallen die Unterschiede bei den Konfliktkenngrößen aus. TTC weist in beiden Szenarien annähernd die gleichen Lageparameter auf, wobei durch das nicht regelkonforme Verhalten sich die Spannweite leicht nach unten verschiebt und somit eine tendenzielle Steigerung der Konfliktschwere zu beobachten ist. Auch die Verteilungen von PET ähneln sich, wobei der Wertebereich von REF V3 NRKV höher liegt. Mit der Überlegung, dass eine erhöhte Unaufmerksamkeit zu einer längeren Reaktions- und damit Bremszeit führt, kann die Annahme getroffen werden, dass stärkere Konflikte erzeugt werden und die Lageparameter von PET sich nach unten verschieben. Diese Argumentation lässt sich anhand der vorliegenden Ergebnisse allerdings nicht bestätigen. Eine mögliche Begründung dafür kann sein, dass auch die Beschleunigungszeiten beeinflusst werden und sich damit die Zeitabstände zwischen den Fahrzeugen wiederum verlängern und in eine höhere PET resultieren.

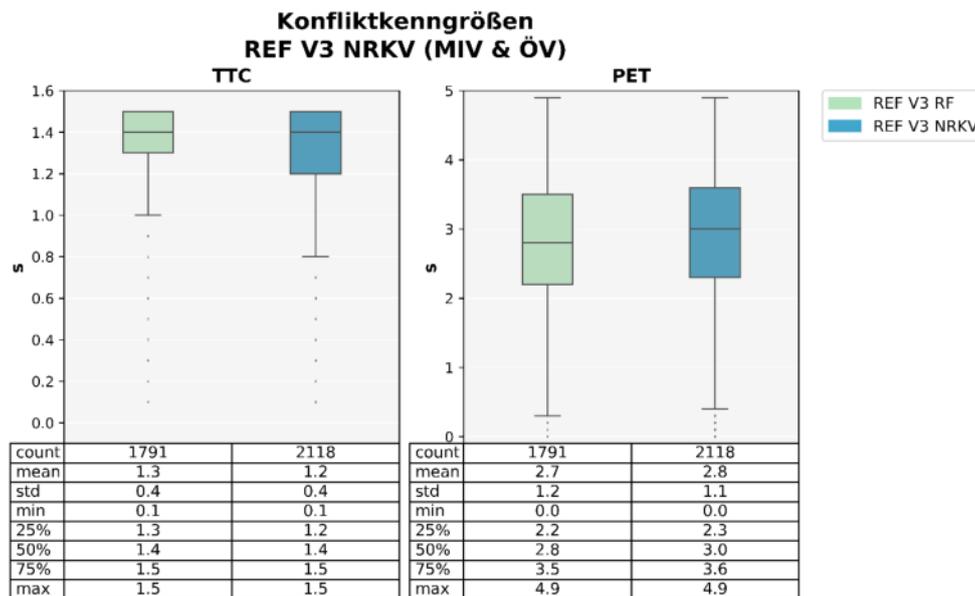


Abbildung 96: REF V3 NRKV - Vergleich TTC und PET

In Abbildung 97 ist wiederum ein Ausschnitt der Konflikte im Netz ersichtlich. Ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Szenarien ist zwar nicht erkennbar, aber die Steigerung von 18 % spiegelt sich in der höheren Konfliktdichte wider.

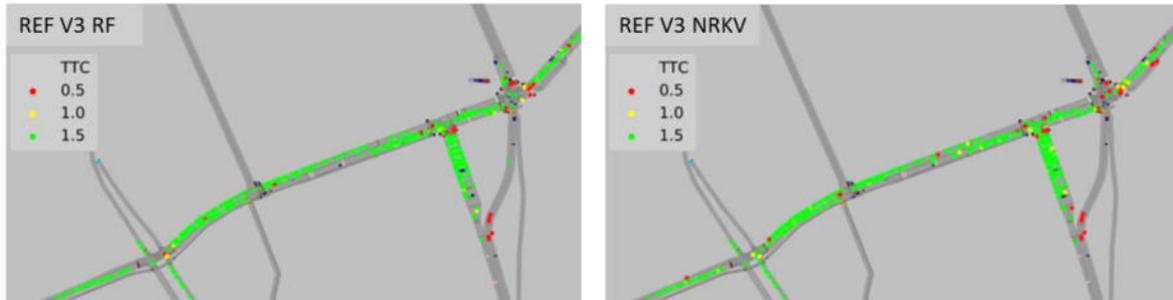


Abbildung 97: REF V3 NRKV - Vergleich Konflikte im Netz

Um einen genaueren Blick auf die Rotlichtmissachtung zu werfen, können die Konflikte zwischen Radfahrern und motorisiertem Verkehr herangezogen werden. Hierbei ergeben sich insgesamt über alle zehn Läufe im Szenario REF V3 RF nur 14 und bei REF V3 NRKV nur 17 Konflikte, aus diesem Grund sind hier keine statistischen Analysen möglich. Allerdings ist anhand des Netzvergleiches ersichtlich, dass an der betroffenen VLSA zusätzliche Konflikte erzeugt werden und damit durch die Rotlichtmissachtung ein neues Konfliktpotenzial in das Netz integriert wird.

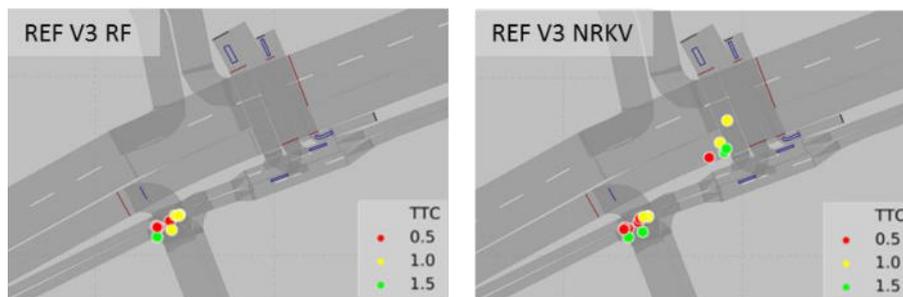


Abbildung 98: REF V3 NRKV - Vergleich Konflikte Neubaugasse

Nicht regelkonformes Verhalten ist eine der Hauptursachen für Unfälle und Konflikte im realen Verkehrsgeschehen, ist aber noch ein weitgehend unberücksichtigter Aspekt in der Kalibrierung. Anhand der hier vorliegenden Ergebnisse ist ersichtlich, dass Parametervariationen bezüglich der Aufmerksamkeit und Rotlichtmissachtung deutlich die Simulation beeinflussen und damit ein Potenzial für Kalibrierungsmöglichkeiten in der Verkehrssicherheit schaffen.

5.1.4 Zufusserhöhung (REF V3 +q)

Mit einer Erhöhung des Verkehrsaufkommens steigert sich auch das Konfliktpotenzial, da sich mehr Fahrzeuge auf der gleichen Fläche befinden. Inwiefern sich dieses Potential auf die konkreten Konflikte auswirkt, wird im Rahmen dieser Teilstudie untersucht. Herangezogen wurde dafür das Gebiet der Wickenburggasse, in der eine Steigerung der Belastung um 50 % forciert wurde. Zur Ermittlung des Verkehrsaufkommens wurden zusätzliche Messquerschnitte im Osten der Wickenburggasse angelegt und die Belastung streckenfein, aber nicht fahrstreifenfein ermittelt. Die mit dem Faktor 1,5 multiplizierte Verkehrsstärke wurde anschließend als Referenzwert für die Maßnahmen in der Wickenburggasse herangezogen.



Abbildung 99: Messquerschnitte Wickenburggasse

Da eine einfache Erhöhung der Zuflüsse zu einer Überstauung im Netz geführt hätte, wurde der Verkehr über eine Abänderung der Routenverteilung in die Wickenburggasse eingeleitet. Dabei wurden im ersten Schritt diejenigen Routen, die über die Wickenburggasse führen, um 50 % erhöht, und die überschüssigen Fahrzeuge von den anderen Routen prozentuell verteilt abgezogen. Aus dieser Umleitung entstandene Kapazitätsengpässe im restlichen Netz wurden mit einer Feinjustierung der Routenanteile beseitigt.

Weitere Maßnahmen zur Zuflusserhöhung betreffen die VLSA an der Grabenstraße und an der Körösisstraße. Da die VLSA 501 über eine verkehrabhängige Steuerung verfügt und hier ein umfangreiches Programm hinterlegt ist, wurde eine Beeinflussung nur über Wegnahme der Straßenbahnlinien 4 und 5 realisiert. Eine weitere Veränderung wurde an der VLSA 502 durchgeführt, die den Knoten am östlichen Ende der Wickenburggasse regelt und über eine Festzeitsteuerung verfügt. In Abbildung 100 ist dieser Knoten mit den dazugehörigen Signalgruppen dargestellt.

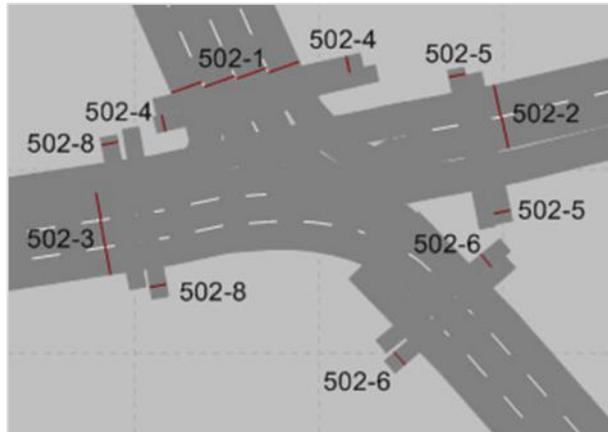


Abbildung 100: Signalgruppen VLSA 502

Ziel dieser Adaption war es, den Abfluss trotz höheren Verkehrsaufkommens aus der Wickenburggasse zu gewährleisten und gleichzeitig mehr Verkehr in die Wickenburggasse einzuleiten. Dafür wurde der Signalgruppe 502-1 zugunsten 502-3 eine Sekunde weggenommen. Zusätzlich wurde aus der Humboldtstraße dem Verkehr eine insgesamt 4 Sekunden längere Gründauer gewährt, während diese den Fußgängern aufgrund des geringen Zuflusses gekürzt wurde. Die veränderten Grünzeiten und das Signalprogramm sind Tabelle 20 und Abbildung 101 zu entnehmen.

Tabelle 20: VLSA 502 Gründauer

Signalgruppe	REF V3			REF V3 +q		
	Start	Ende	Gründauer	Start	Ende	Gründauer
502-1	75	11	26	75	10	25
502-2	17	65	48	16	68	52
502-3	17	55	38	16	55	39
502-4	15	58	43	14	58	44
502-5	73	3	20	73	2	19
502-6	62	65	3	62	65	3
502-7	62	65	3	62	65	3
502-8	75	4	19	75	3	18
502-9	75	51	66	75	51	66
502-10	75	51	66	75	51	66
502-11	58	64	6	58	64	6



Abbildung 101: Signalplan VLSA 502

Mit all diesen Maßnahmen zusammen konnte letztendlich ein um 50 % höheres Verkehrsaufkommen in der Wickenburggasse erreicht werden. Da diese Eingriffe teilweise auf das gesamte Netz wirken, konnten Veränderungen der Querschnittswerte außerhalb der Wickenburggasse nicht ganz vermieden, aber zumindest in vertretbaren Rahmen gehalten werden.

Tabelle 21: Querschnittsmessungen Wickenburggasse

Querschnitt	REF V3	REF V3 +q	Faktor
Wicken_16	425	555	1,3
Kaiser_17	1028	1028	1,0
Kepler_18	450	479	1,1
Parkst_15	1407	1596	1,1
MaTh_16	48	48	1,0
Kepler_16	1002	1011	1,0
Wicken_12	412	614	1,5
Wicken_18	575	878	1,5
Wicken_13	469	703	1,5
Wicken_14	578	863	1,5

Für die Auswertungen werden nur die Ergebnisse im Gebiet der Wickenburggasse herangezogen. Es zeigt sich deutlich, dass wiederum nur die Rear-End-Konflikte von diesen Maßnahmen betroffen sind, deren Anzahl sich um 30 % erhöht. Die Überlegung, dass sich durch eine erhöhte Belastung die Abbiegesituationen am Knoten Laimburggasse/Neubaugasse verschärfen könnten, wird durch die Reduktion der Crossing-Konflikte widerlegt.

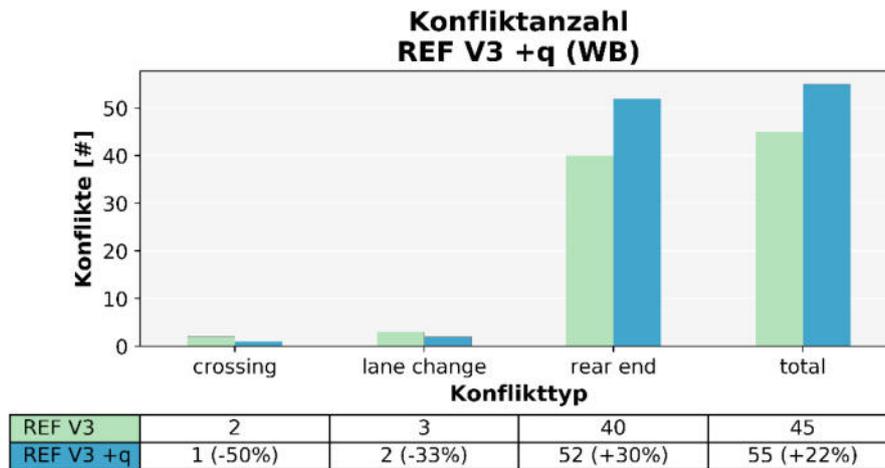


Abbildung 102: REF V3 +q - Vergleich Konfliktanzahl

Für die Konfliktkenngrößen scheint das erhöhte Verkehrsaufkommen kaum Auswirkung zu haben. Es ergibt sich sowohl bei TTC als auch bei PET durch die veränderte Verkehrsbelastung eine leichte Absenkung der Lageparameter, wodurch sich eine minimale Tendenz in Richtung höhere Konfliktschwere abzeichnet.

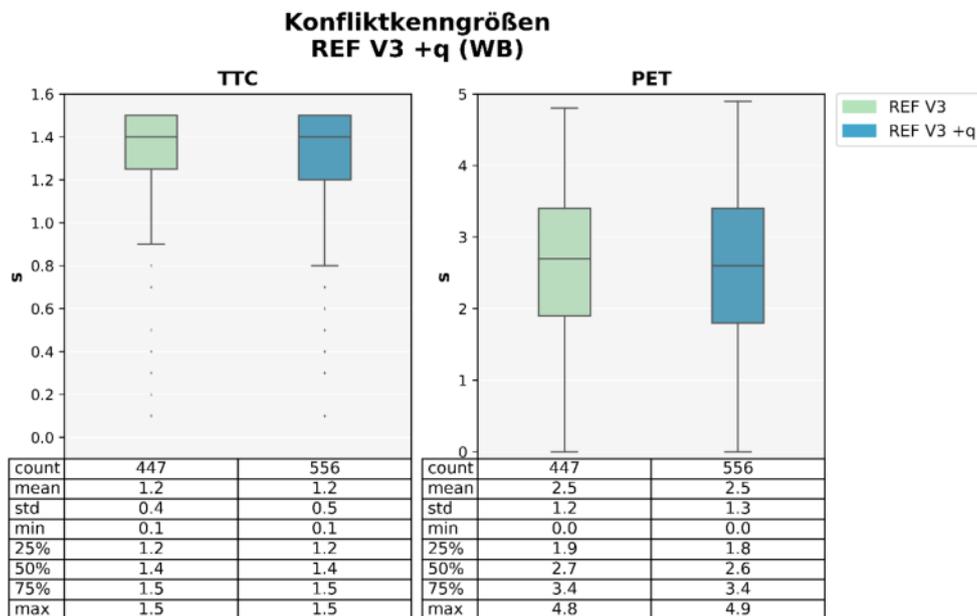


Abbildung 103: REF V3 +q - Vergleich TTC und PET

Unterschiede sind in der Verortung der Konflikte zu erkennen. Es ist nicht nur ein Wachstum der Konfliktbereiche zu beobachten, sondern auch die Dichte hat sich gegenüber dem Szenario REF V3 deutlich erhöht. Zusätzlich treten mehr Konflikte mit einem $TTC \leq 0,5$ in den Kreuzungsbereichen auf.

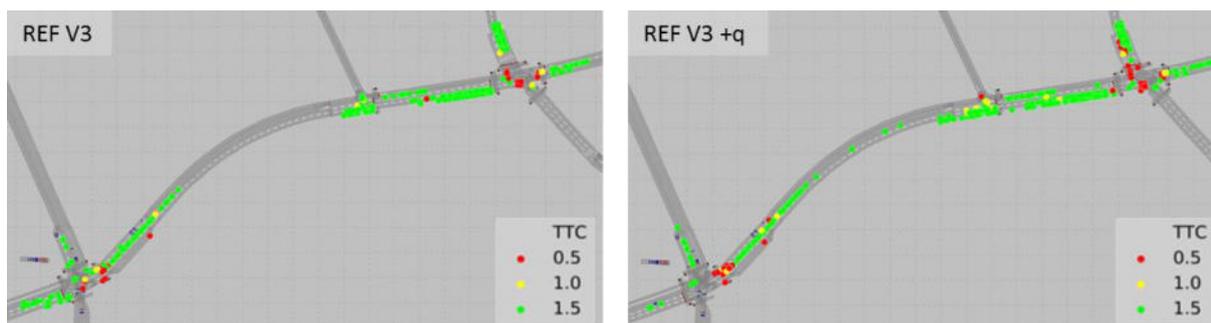


Abbildung 104: REF V3 +q - Vergleich Konflikte im Netz

5.2 Sichtweitenuntersuchung

Die Untersuchung von Sichtweiten basiert auf den Richtlinien aus dem Entwurf plangleicher Knoten, die in der RVS 03.05.12 (FSV, 2007) verankert sind. Dabei sind zwei Begrifflichkeiten bezüglich der Sichtweiten zu unterscheiden. Die **Anfahr-sicht** ist jene Sicht, die für ein am Knoten anhaltendes Fahrzeug mindestens vorhanden sein muss. Ausgegangen wird hierbei von einem Knotenbeobachtungspunkt mit einem Abstand von 3 Metern von der Bordflucht-kante. Die **Annäherungs-sicht** ist jene Sicht, die einem Fahrzeuglenker schon aus größerem Abstand eine Beurteilung der Verkehrssituation der übergeordneten Straße erlaubt und gegebenenfalls das Einfahren in die übergeordnete Straße ohne anzuhalten ermöglicht, wobei hier eine Knotenbeobachtungsdistanz von 15 Meter vorausgesetzt wird.

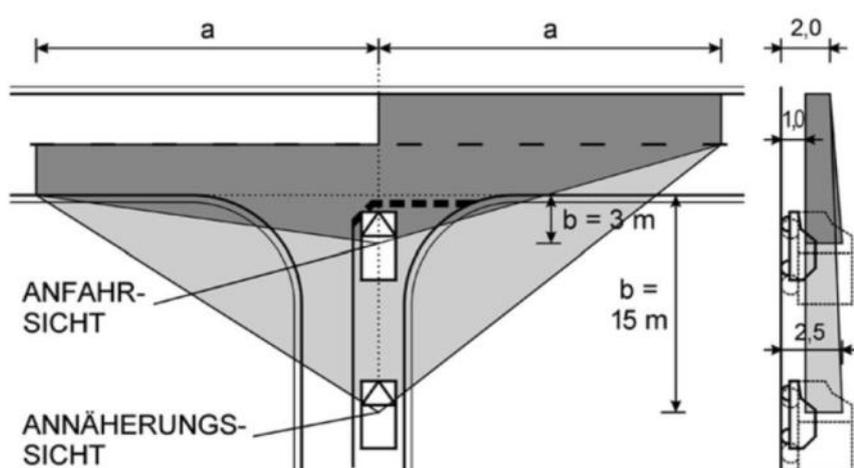


Abbildung 105: Sichtweiten in der RVS 03.05.12 (FSV, 2007)

Abhängig von der erlaubten Höchstgeschwindigkeit gelten für den innerstädtischen Bereich folgende Distanzen für die jeweilige Sichtweite.

Tabelle 22: Sichtweiten im Ortsgebiet (Lohse und Schnabel, 2011)

Ausgangsgeschwindigkeit [km/h]	Anfahrtsichtweite [m]	Annäherungssichtweite [m]
30	30	30
40	50	50
50	70	70

Als Untersuchungsumgebung wurde der Knoten Laimburggasse/Wickenburggasse im Szenario REF V3 gewählt, da dieser aufgrund der Bebauung über eingeschränkte Sichtverhältnisse verfügt. In Abbildung 106 ist der Knoten ersichtlich, wobei die Strecke 13 die Laimburggasse darstellt und alle anderen Strecken der Wickenburggasse bzw. dem querenden Fußgängerverkehr zuzuordnen sind. Wesentlich für diese Untersuchung sind die Verbindner 10067 und 10063, die aus der Laimburggasse in die Wickenburggasse führen.

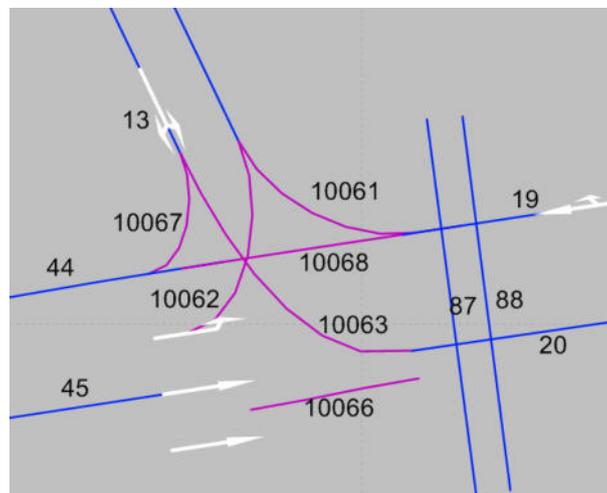


Abbildung 106: Strecken Knoten Laimburggasse/Wickenburggasse

Die Geschwindigkeitsbeschränkung in der Laimburggasse beläuft sich auf 30 km/h, woraus sich folglich Annäherungs- und Anfahrtsichtweiten von jeweils 30 Metern ergeben, die in Abbildung 107 dargestellt sind. Es zeigt sich, dass zwar die Anfahrtsichtweite, aber nicht die Annäherungssichtweite eingehalten wird. Somit müsste im Abstand von 15 Metern die Geschwindigkeit bereits unter der Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h liegen.

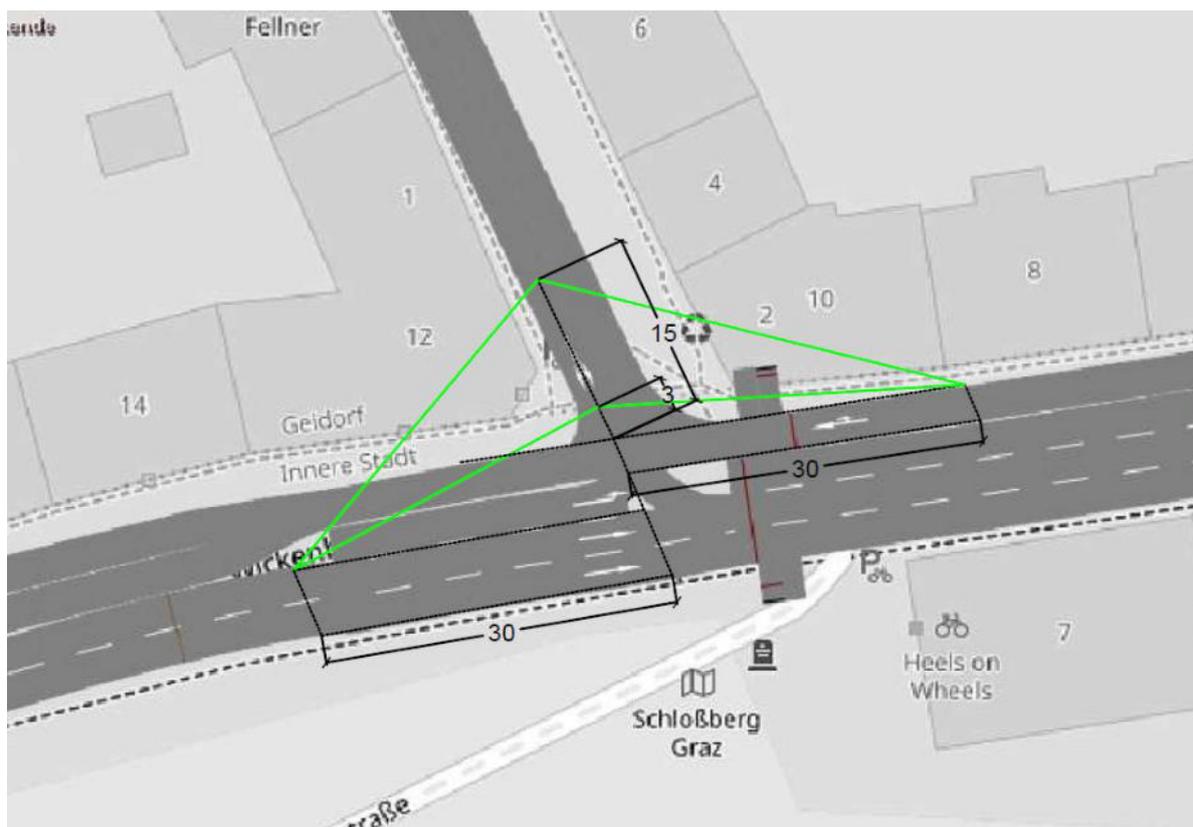


Abbildung 107: Sichtweiten am Knoten Laimburggasse/Wickenburggasse

Zur Modellierung eingeschränkter Sichtverhältnisse werden zwei Ansätze gewählt, die einerseits Konfliktflächen und andererseits Langsamfahrbereiche betreffen. Die Konfliktflächen verfügen über den Parameter *Sichtbarkeit Strecke*, der die maximale Entfernung in Metern angibt, aus der ein sich näherndes Fahrzeug auf der anderen Strecke die Fahrzeuge wahrnehmen kann. Der Abstand wird in Abbildung 108 mit d_{L2} bezeichnet und ist in den Defaulteinstellungen mit 100 Metern angegeben. Dieser Wert wurde aufgrund der engen Bebauung für die Konfliktflächen auf den Verbindern 10067 und 10063 aus der Laimburggasse auf 5 Meter herabgesetzt, da es erst ab der Distanz möglich ist, sich einen ausreichenden Überblick über die Kreuzung zu verschaffen. Durch diese Einstellung wird gewährleistet, dass die Simulationsfahrzeuge sich bereits mit reduzierter Geschwindigkeit dem Knoten nähern.

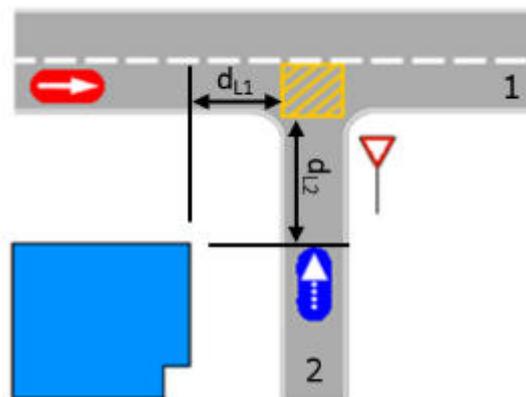


Abbildung 108: Parameter Sichtbarkeit Strecke (PTV, 2016)

Der zweite Ansatz läuft über Langsamfahrbereiche, die wiederum auf die beiden Verbinder gesetzt wurden. Dabei wurde eine Wunschgeschwindigkeitsverteilung von 5 km/h gewählt, die einen Wertebereich von 4 bis 6 km/h umfasst. Wesentlich hierfür ist, dass die Fahrzeuge soweit vorher zu verzögern beginnen, sodass sie mit der geforderten Wunschgeschwindigkeit über den Langsamfahrbereich fahren, wobei Maximalverzögerungen, in diesem Fall 2 m/s^2 für PKW, vorgegeben werden.

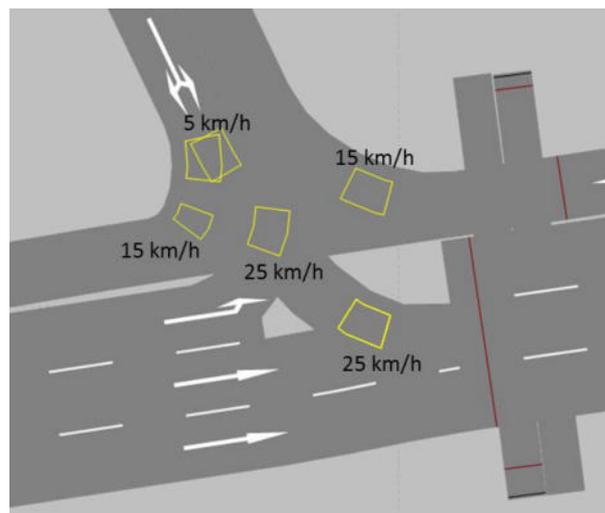


Abbildung 109: Langsamfahrbereiche am Knoten Laimburggasse/Wickenburggasse

Die notwendigen Daten für die Auswertung wurden aus den Fahrzeugprotokollen gewonnen, wobei aufgrund des hohen Rechenaufwandes nur ein Simulationslauf herangezogen wurde. Für die Untersuchung von Einzelkonflikten war es ausreichend Geschwindigkeit und Beschleunigung direkt aus dem Protokoll zu extrahieren. Zusätzlich wurden mittels der Koordinaten Distanzen für die in der Auswertung relevanten Punkte eruiert. Dafür wurde anhand der Wartepositionen der VISSIM-Fahrzeuge eine Haltelinie definiert und ausgehend von dieser die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge entlang der Laimburggasse ermittelt. Anhand der im Fahrzeugprotokoll gespeicherten Koordinaten wurden die Distanzen zur Haltelinie für jedes Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt berechnet. Diese wurden anschließend Werten zwischen 0 und 35 Metern im Intervall von 5 zugeordnet, wobei eine Toleranz von einem Meter berücksichtigt wurde. Somit werden beispielsweise Distanzen, die zwischen 9 und 11 Metern liegen unter dem Wert 10 zusammengefasst.



Abbildung 110: Distanzmessung Laimburggasse

Zur Untersuchung der Sichtweiten wurde zunächst ein geeigneter im Szenario REF V3 detektierter Konflikt herangezogen, der bereits in Abschnitt 3.2.1 kurz beschrieben wurde und dessen Eckdaten in Tabelle 23 zusammengefasst sind.

Tabelle 23: Kenngrößen Konflikt 1491

Nr	1491
Simulationssekunde	3258,4
FirstVID	4345
SecondVID	4260
TTC	0,9
PET	1,4
X-Koordinate des Konfliktpunktes	-66,35
Y-Koordinate des Konfliktpunktes	63,76

Es handelt sich hierbei um einen Crossing-Konflikt, bei dem das Fahrzeug 4345 aus der Laimburggasse ausbiegt und dadurch das Fahrzeug 4260 in der Wickenburggasse zu einem Bremsmanöver zwingt, um eine Kollision zu vermeiden.

Mit der Veränderung der Konfliktflächen kommt der Konflikt zwischen den beiden Fahrzeugen in SSAM nicht mehr zustande und somit ist diesbezüglich kein Vergleich möglich. Allerdings können die Trajektorien der beiden Fahrzeuge gegenübergestellt werden. In Abbildung 111 sieht man links die fahrdynamischen Details der beiden Fahrzeuge im REF V3 und rechts mit eingestellten Konfliktflächen. Im Ausgangsszenario ist zu erkennen, dass das Fahrzeug 4345 aus der Laimburggasse noch einmal kurz vor dem Konfliktpunkt beschleunigt, um diesen noch vor dem Fahrzeug 4260 in der Wickenburggasse zu passieren. Anhand der geknickten Trajektorie nach dem Passieren der Konfliktfläche ist außerdem ersichtlich, dass durch die hohe Geschwindigkeit das Fahrzeug sich nicht direkt in den gewünschten Fahrstreifen einordnen kann und noch einmal verzögern muss, um sich in diesen einzureihen. Das

Fahrzeug 4260 hingegen muss mit über 4 m/s^2 abbremsen, um eine Kollision zu vermeiden, wodurch sich dessen Geschwindigkeit auf 10 km/h reduziert. Auf der rechten Seite sind die Trajektorien der beiden Fahrzeuge nach Einstellung der Konfliktfläche dargestellt. Die Fahrzeuge treffen zum selben Zeitpunkt wieder aufeinander, allerdings hält das Fahrzeug 4345 in diesem Fall an, wobei wieder recht große Verzögerungen von 4 m/s^2 auftreten. Nach der Konfliktfläche ist es dem Fahrzeug möglich, sich direkt in den richtigen Fahrstreifen einzuordnen und somit entfällt der Knick der Trajektorie. Im Gegenzug dazu kann das Fahrzeug 4260 in der Wickenburggasse annähernd seine Wunschgeschwindigkeit realisieren. Folglich wurde mit der Änderung des Parameters nicht nur eine Vermeidung des Konfliktes erzielt, sondern auch ein vorsichtigeres Annähern an die Konfliktfläche, was sich positiv auf die Konstellation der hier betrachteten Fahrzeuge als auch auf die Trajektorie danach auswirkt. Prinzipiell besteht durch eine Absenkung des Sichtbarkeitsparameters der Konfliktfläche die Gefahr von Störungen des Verkehrsflusses, wie beispielsweise in Form eines Rückstaus. Aus diesem Grund sind bei den hier zur Anwendung kommenden Parametereinstellungen Auswirkungen auf das gesamte Netz anhand der Simulation oder Ergebnisprotokollen zu prüfen. Da in der hier herangezogenen Laimburggasse der Zufluss mit etwa 80 Fzg/h sehr gering ausfällt, sind hier diesbezüglich keine Probleme für verkehrliche Kenngrößen zu verzeichnen.

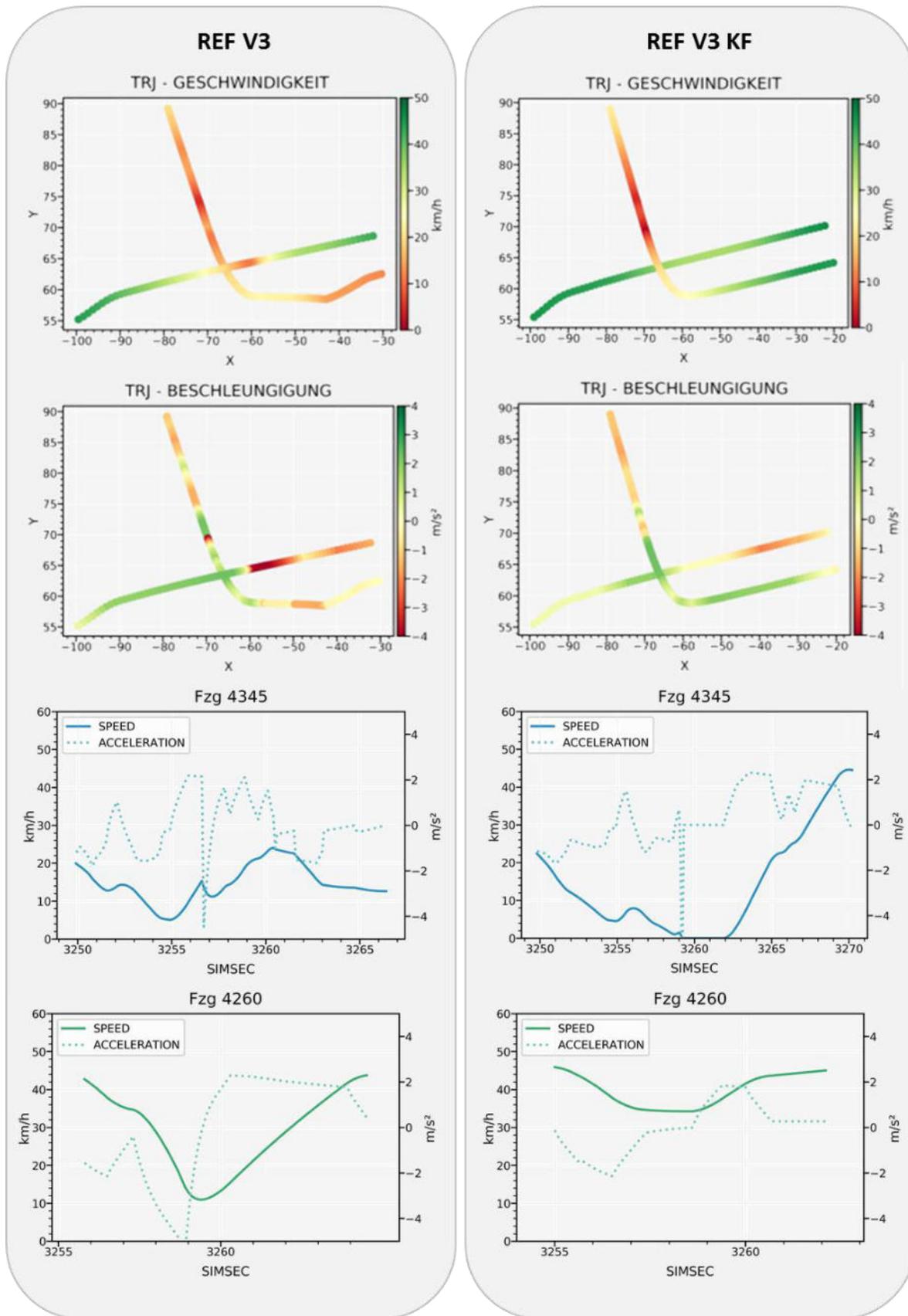


Abbildung 111: Vergleich Bewegungstrajektorien mit und ohne Parametrierung der Konfliktfläche

Ein ähnlicher Vergleich mit den Einstellungen bezüglich Langsamfahrbereichen ist leider nicht möglich, da sich hier die Ergebnisse so eklatant verändert haben, dass diese beiden Fahrzeuge nicht mehr aufeinandertreffen.

Um die Sichtweitenuntersuchung nicht nur auf einen Konflikt zu reduzieren, wurden die Geschwindigkeitsverläufe der einzelnen Szenarien untersucht. Als Referenz dient ein Geschwindigkeits-Weg-Diagramm mit einer Verzögerung von $1,5 \text{ m/s}^2$ bis zum Stillstand ohne Berücksichtigung der Reaktionszeit.

$$v_1 = \sqrt{v_0^2 + 2 * a * s}$$

a ... Beschleunigung

v ... Geschwindigkeit

s ... Weg

In Abbildung 112 sind die Geschwindigkeiten im Szenario REF V3 dargestellt, während die Beschleunigungen im Anhang 8.1.5 zu finden sind. Es ist ersichtlich, dass die Interquartilsabstände tendenziell der Referenzkurve folgen und mit zunehmender Annäherung an den Knotenpunkt die VISSIM-Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit reduzieren. Allerdings zeigt sich auch, dass Modal- und Mittelwerte bis 20 Meter vor der Haltelinie immer über dem Referenzwert liegen, was auf den fast durchgängigen Maximalwert von 30 km/h zurückzuführen ist. Daraus lässt sich schließen, dass die Mehrheit der Fahrzeuge sich mit deutlich größerer Geschwindigkeit annähert und wesentlich höhere Verzögerungen aufbringen muss, um noch rechtzeitig anhalten zu können. Der Verlauf der Beschleunigung im Anhang 8.1.5 bestätigt dies, da kurz vor der Haltelinie Maximalverzögerungen von unter 5 m/s^2 auftreten. Auffallend sind die Geschwindigkeiten direkt an der Haltelinie, wo zwar der Median und der Mittelwert annähernd bei 0 km/h liegen und somit der Großteil der Fahrzeuge hier hält, allerdings noch Geschwindigkeiten bis zu 28 km/h vertreten sind, wenn auch nur in Form von Ausreißern.

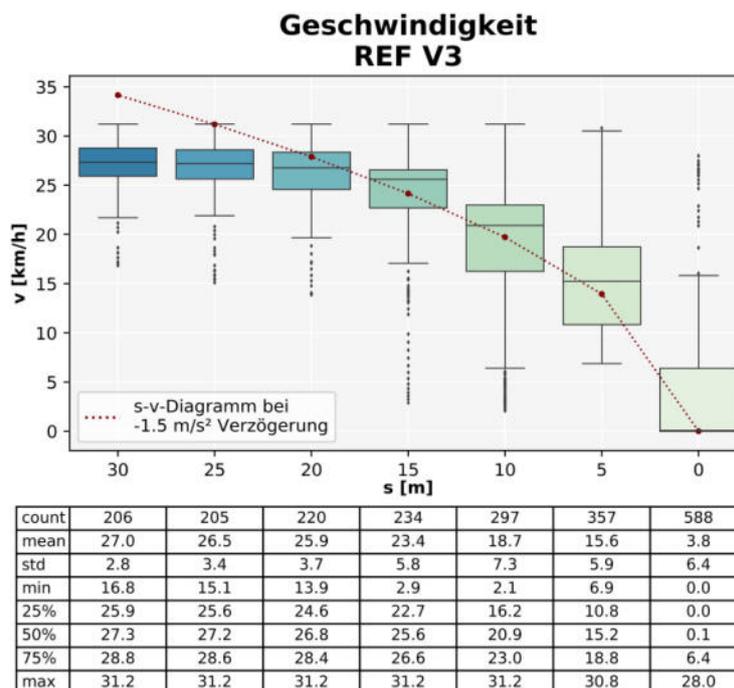


Abbildung 112: REF V3 - Geschwindigkeitsverlauf Laimburggasse

Durch die Einstellungen bezüglich der Konfliktflächen scheint sich ein vorausschauendes Fahrverhalten ergeben zu haben. Die Fahrzeuge beginnen bereits 15 Meter vor der Haltelinie ihre Geschwindigkeit zu reduzieren. Hier sinken nicht nur die Interquartilsbereiche mit zunehmender Annäherung, sondern auch die Maximalwerte, die sich kurz vor der Haltelinie fast halbiert haben. Der Interquartilsabstand hat sich bei 0 Metern um etwa zwei Drittel reduziert und mehr als 5 km/h sind nur noch in Form von Ausreißern vertreten. Durch eine detailliertere Parametrierung der Konfliktflächen kann somit ein vorsichtigeres Fahrverhalten der FFE bei Annäherung an unübersichtlichen Knotenpunkten modelliert werden.

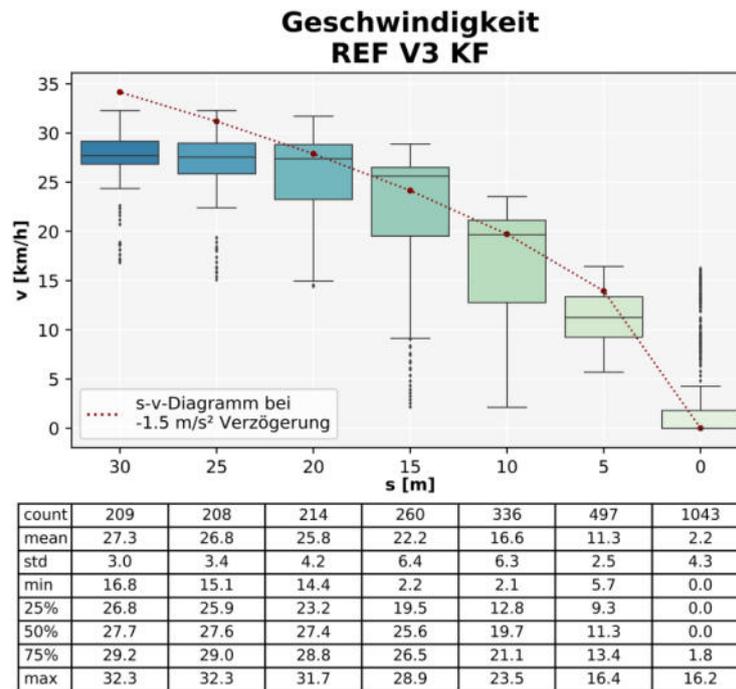


Abbildung 113. REF V3 KF - Geschwindigkeitsverlauf Laimburggasse

Durch die Implementierung von Langsamfahrbereiche, liegt der Wertebereich bei allen Distanzen unter der Referenzkurve mit Ausnahme direkt an der Haltelinie. Somit sind fast alle Fahrzeuge in der Lage mit der aktuellen Verzögerung rechtzeitig anzuhalten. Auffallend ist dabei besonders das Verhalten bei 15 Metern, wo ein hoher Anteil mit stillstehenden Fahrzeugen zu verzeichnen ist, der sich bei Annäherung an die Haltelinie wieder langsam reduziert. Dies deutet daraufhin, dass sich durch die Langsamfahrbereiche auch kurze Stauungen in der Laimburggasse ergeben, die sich aber bei Betrachtung der Simulationsanimation als vernachlässigbar erwiesen haben. An der Haltelinie treten nun nur noch Geschwindigkeiten von maximal 7,6 km/h auf, wobei die Breite des Interquartilsabstandes nur minimal geringer ist als bei REF V3.

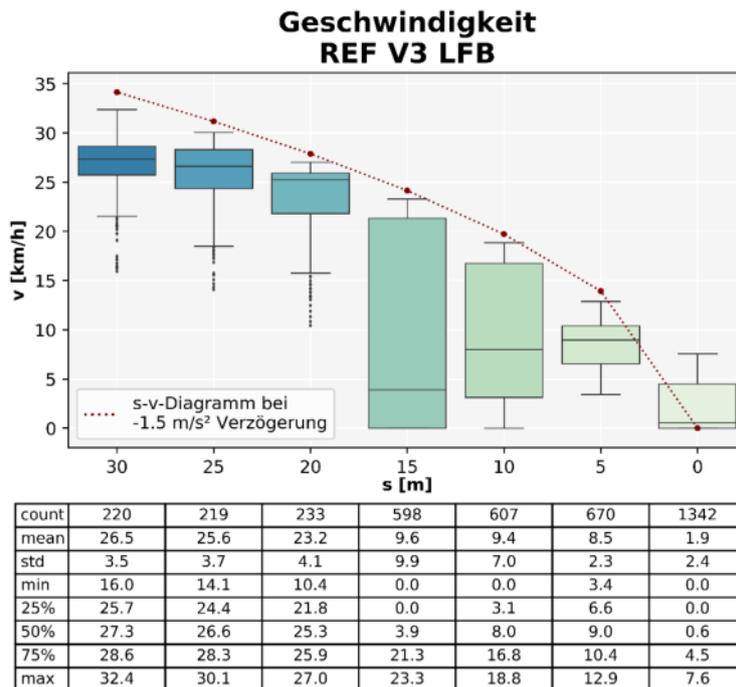


Abbildung 114: REF V3 LFB - Geschwindigkeitsverlauf Laimburggasse

Eine Analyse der Konfliktanzahl ist in diesem Fall nicht sinnvoll, da sie zu gering ist, um Aussagen treffen zu können. Allerdings ist eine Beurteilung der Auswirkungen auf die Konflikte anhand der Konfliktkarte möglich. Sowohl durch die Einstellung bezüglich Konfliktflächen als auch bei den Langsamfahrbereichen werden die Crossing-Konflikte, die durch das Ausfahren aus der Laimburggasse entstehen deutlich reduziert. Im Gegenzug dazu ist in beiden Fällen ein Anstieg der Rear-End-Konflikte vor dem Signalgeber in der Wickenburggasse zu verzeichnen.

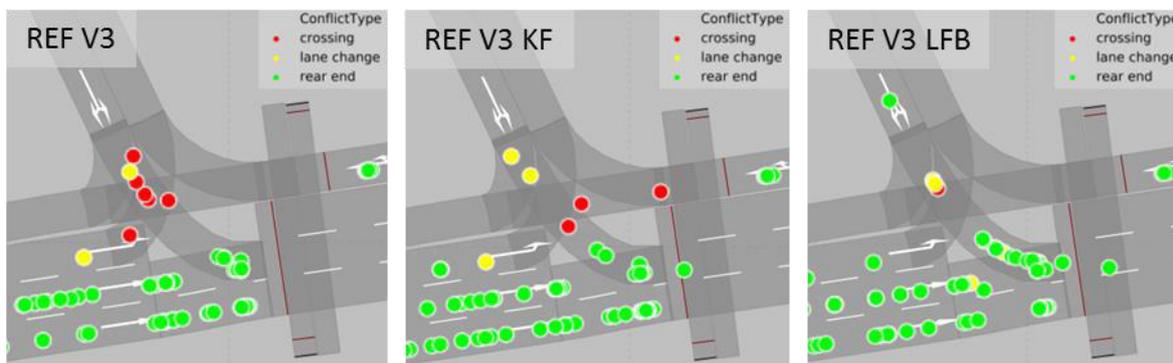


Abbildung 115: Vergleich Konflikte Laimburggasse

Anhand der geforderten 30 Meter Annäherungs- und Anfahrtsichtweite sind die Geschwindigkeiten bei 15 bzw. 3 Metern vor der Wickenburggasse in REF V3 deutlich zu hoch. Mit einer Parametrierung der Konfliktflächen können am besten die Geschwindigkeiten direkt vor der Haltelinie reduziert werden, während Langsamfahrbereiche über eine weitere Distanz das Verzögerungsverhalten beeinflussen können. Um an unübersichtlichen Knotenpunkten eine detailgetreue Modellierung erzielen zu können, ist eventuell eine Kombination dieser beiden Netzelemente empfehlenswert.

5.3 Fahrdynamik

Ein wesentlicher Aspekt in Bezug auf Verkehrssicherheit ist die Fahrdynamik, die in VISSIM, das vorrangig zur Untersuchung von Verkehrsflüssen dient, eine untergeordnete Rolle spielt. Hingegen ist sie für die Betrachtung von Konflikten insbesondere bei Kurvenfahrten von besonderer Bedeutung.

Angesetzt wurde hier bei den mechanisch möglichen Höchstgeschwindigkeiten in der Kurve, die sich in Anlehnung an Burg (2017) folgendermaßen ermitteln lassen. Ausgegangen wird zur Systemvereinfachung hierbei von einem konstanten Radius und einer konstanten Geschwindigkeit. Um das Kräftegleichgewicht aufzustellen kommt ein mitbewegtes Koordinatensystem zum Einsatz, dessen Ursprung im Schwerpunkt des Fahrzeuges liegt.

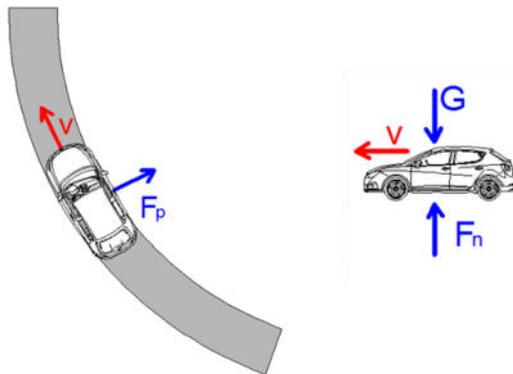


Abbildung 116: Kräfte in Kurvenfahrt

Solange das Fahrzeug in der Kurve fährt und nicht ins Rutschen kommt, entspricht die Zentripetalkraft der Haftreibungskraft. Diese wiederum setzt sich aus dem Haftreibungsbeiwert und der Normalkraft zusammen, während die Normalkraft der Gewichtskraft des Fahrzeuges entspricht.

$$F_p = F_h$$

$$F_h = \mu F_n$$

$$F_n = G = mg$$

F_n ... Normalkraft
 F_p ... Zentripetalkraft
 F_h ... Haftreibungskraft
 G ... Gewichtskraft

Die Zentripetalkraft ergibt sich aus der Masse und der Zentripetalbeschleunigung a_q . Diese wiederum aus dem Verhältnis von Geschwindigkeit und Radius.

$$a_q = \frac{v^2}{R}$$

$$F_p = ma_q = \frac{mv^2}{R}$$

R ... Radius
 m ... Masse
 a_q ... Seitenbeschleunigung

Damit das Fahrzeug nicht aus der Kurve fährt, muss die Haftreibungskraft größer als die Zentripetalkraft sein. Aus dieser Gleichung wird in Folge durch Umformung die maximale Geschwindigkeit ermittelt, mit der die Kurve durchfahren werden kann.

$$\frac{mv^2}{R} \leq \mu mg$$

$$v_{max} = \sqrt{\mu g R}$$

Diese Berechnung stellt eine Vereinfachung dar, weil von einer sehr geringen Querneigung ausgegangen werden kann und folglich der Neigungswinkel in diesem Fall keine Berücksichtigung findet. Die Reibungsbeiwerte zur Berechnung der Höchstgeschwindigkeit in der Kurve sind je nach Beschaffenheit der Fahrbahn und Wetterbedingungen unterschiedlich.

Tabelle 24: Reibungsbeiwerte nach Bodenbeschaffenheit und Witterung (Burg, 2017)

	Trocken		Nass	
	< 48 km/h	> 48 km/h	< 48 km/h	> 48 km/h
Asphalt befahren	0,60–0,80	0,55–0,70	0,45–0,70	0,40–0,65
Glatteis	0,10–0,25	0,07–0,20	0,05–0,10	0,05–0,10

Für die Untersuchung wird ebenfalls wieder der Knoten Laimburggasse/Wickenburggasse herangezogen. Zur Ermittlung der Radien wurden anhand einer Abbildung des Netzes Kreise annäherungsweise eingepasst.

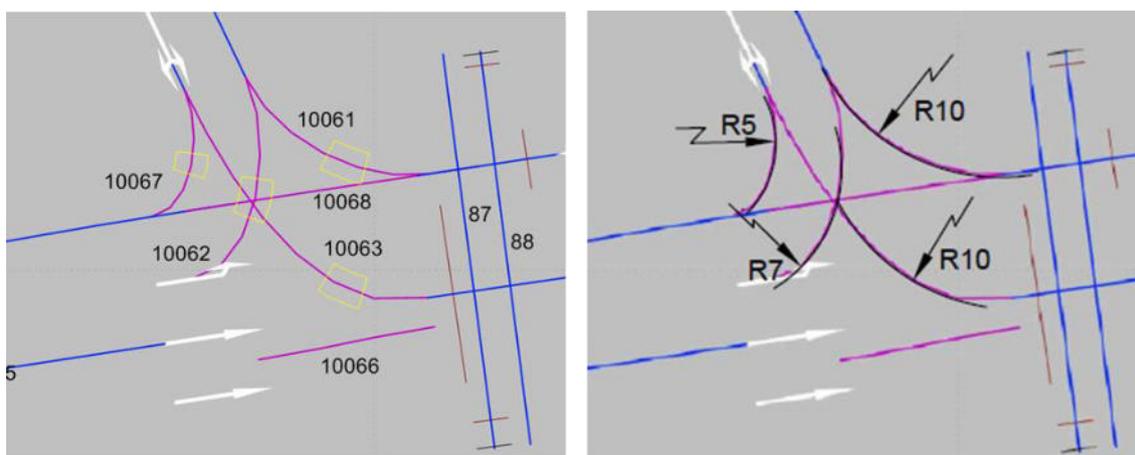


Abbildung 117: Strecken und Radien Laimburggasse

Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, dass die Kurven bereits über Langsamfahrbereiche zur Modellierung von Kurven verfügen, um die Geschwindigkeit zu reduzieren. Diese sind bei Rechtskurven mit der v-Wunschverteilung 15 km/h und einem Wertebereich von 13,5 bis 16,5 km/h und bei Linkskurven mit der Verteilung 25 km/h und einem Wertebereich von 22,5 bis 27,5 km/h angelegt.

Die Analyse wurde exemplarisch mit dem Verbinder 10062 im Szenario REF V3 durchgeführt, der von der Wickenburggasse in die Laimburggasse führt. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die bereits implementierten Langsamfahrbereiche auf den anderen Streckensegmenten sich zur Einhaltung der Höchstgeschwindigkeit als ausreichend erwiesen haben. Mit einem Radius von 7 Metern in Kombination mit den letztendlich gewählten Reibungsbeiwerten ergeben sich daraus für den Verbinder 10062 folgende Höchstgeschwindigkeiten als Referenzwerte.

Tabelle 25: Höchstgeschwindigkeiten in der Kurve

Fahrbahnbeschaffenheit	μ	vMax [km/h]
Asphalt trocken	0,6	23,1
Asphalt nass	0,45	20,0
Glatteis	0,1	9,4

Anschließend wurden Parameter des Langsamfahrbereiches variiert und getestet, welche Einstellung letztendlich die VISSIM-Fahrzeuge unter die Höchstgeschwindigkeit bringt. Eine Verlängerung des Langsamfahrbereiches auf vier Meter mit der in Tabelle 26 dargestellten Wunschgeschwindigkeitsverteilung hat konnte am besten den Anforderungen entsprechen.

Tabelle 26: Wunschgeschwindigkeitsverteilung für Kurvenfahrt

	V_{min}	V_{85}	V_{max}	
Szenario REF V3	22,5	25,0	27,5	
Szenario REF V3 FD	18,1	20,6	23,1	

Zur Untersuchung der Fahrdynamik wurde wiederum der Vergleich der Geschwindigkeiten durchgeführt. Betrachtet wurden dabei die Positionen der Fahrzeuge immer nur entlang des Verbinders, über den die Kurve führt. In Abbildung 118 ist der Geschwindigkeitsverlauf der Fahrzeuge auf dem Verbinder in ein Meter Schritten dargestellt, wobei in dunkelgrau der Abschnitt des Langsamfahrbereiches gekennzeichnet ist. Die niedrigen Geschwindigkeiten bei zwei Metern auf der Strecke sind darauf zurückzuführen, dass die Fahrzeuge hier als Linksabbieger gegenüber den Geradeausfahrern in der Wickenburggasse in Richtung Westen wartepflichtig sind. Gegen Ende des Verbinders sind die Fahrzeuge annähernd wieder aus dem Konfliktbereich und beschleunigen, um ihre Wunschgeschwindigkeit realisieren zu können. Wird von normalen Fahrbahnverhältnissen, in diesem Fall trockener Asphalt, ausgegangen, so zeigt sich, dass um den Langsamfahrbereich durchgängig das 75 % Quantil nahe den geforderten 23,1 km/h befindet, allerdings die Maxima deutlich höher sind. In der Realität würden aufgrund dieser Geschwindigkeiten etwa ein Viertel aller Fahrzeuge sogar in trockenen Verhältnissen von der Kurve abkommen. Bei schlechteren Witterungsverhältnissen liegen sogar die Minimalwerte teilweise über den Höchstgeschwindigkeiten und damit wäre keines der Fahrzeuge dazu in der Lage, unter realen Bedingungen, die Kurve zu passieren.

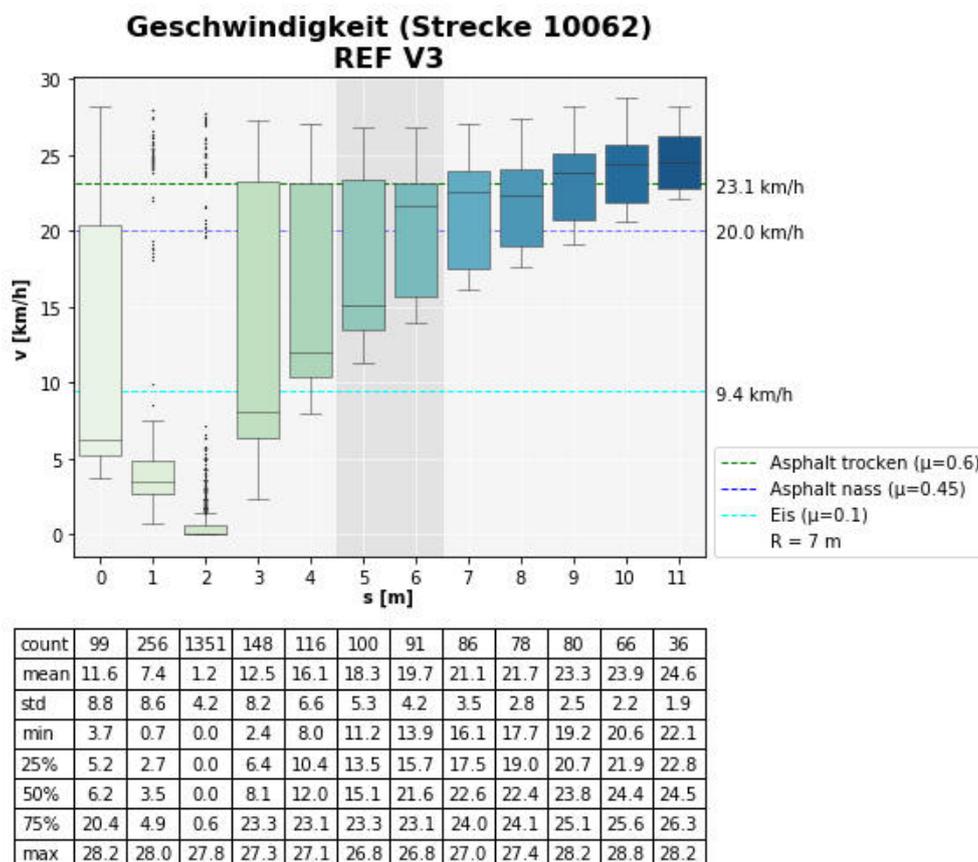


Abbildung 118: REF V3 - Geschwindigkeitsverlauf Strecke 10062

Durch die Adaptierung der Wunschgeschwindigkeit des Langsamfahrbereiches haben sich die Geschwindigkeiten soweit reduziert, dass fast durchgängig 75 % der Fahrzeuge die Kurve auch bei nasser Fahrbahn passieren könnten. Bei trockener Fahrbahn fahren hingegen annähernd alle Fahrzeuge unter der geforderten Kurvenmaximalgeschwindigkeit. Übertretungen sind nur in den Randbereichen zu verzeichnen, wobei dies aufgrund des Überganges von Gerade auf Strecke und umgekehrt weitgehend vernachlässigt werden kann. Allerdings zeigt sich auch, dass für Analysen unter extremen Wetterverhältnissen wie Schnee und Eis eventuell eigene Untersuchungen anzusetzen sind.

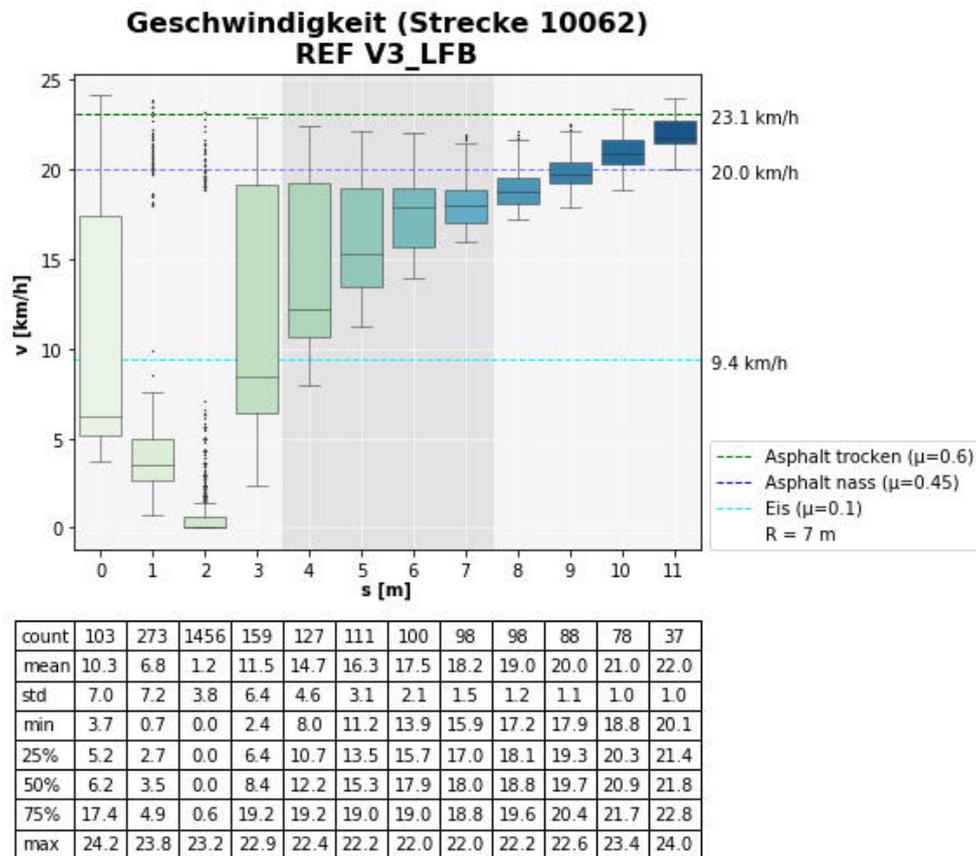


Abbildung 119: REF V3 FD - Geschwindigkeitsverlauf Strecke 10062

Im Vergleich mit Szenario REF V3 ist ersichtlich, dass die die Positionierung und Art der Konflikte durch die Einstellung des Langsamfahrbereiches nicht wesentlich verändert wurden. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Einstellungen keine erheblichen Auswirkungen auf den Umgebungsverkehr haben.

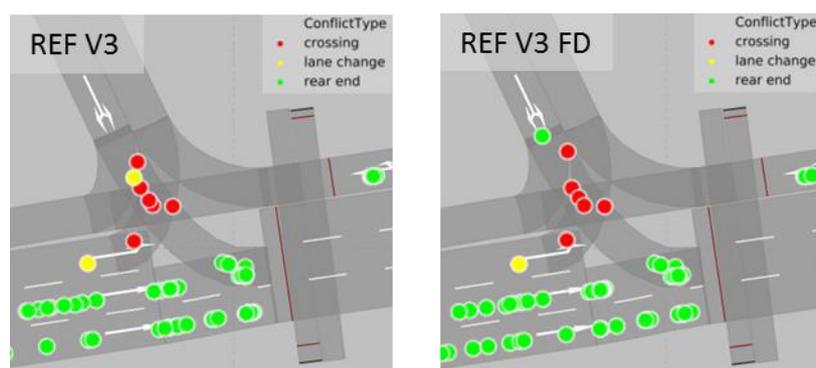


Abbildung 120: Vergleich Konflikte Laimburggasse

Diese Ergebnisse zeigen, dass über eine gezielte Parametrierung von Langsamfahrbereichen das Fahrverhalten der Simulationsfahrzeuge an reale Bedingungen angepasst werden kann. Allerdings ist auch ersichtlich, dass eine einheitliche Implementierung, unterteilt nach Rechts- und Linkskurven, von Langsamfahrbereichen im gesamten Netz in den meisten Fällen ausreichend ist und eine aufwändige Detailanpassung in Abhängigkeit des Radius in vielen Fällen nicht zielführend ist.

6 Fazit

In dieser Arbeit werden unterschiedliche Möglichkeiten zur Kalibrierung einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation für Verkehrssicherheitsanalysen untersucht. Dafür wird zunächst das Verkehrsmodell iterativ an reale Verhältnisse angepasst um eine Basis für weiterführende Parameterstudien zu ausgewählten sicherheitsspezifischen Themenbereichen zu schaffen. Im Zuge dieser Arbeit werden sowohl verkehrliche Kenngrößen kalibriert als auch anhand der generierten Fahrzeugtrajektorien sicherheitsspezifische Analysen unter anderem mittels der Konfliktpunktanalyse durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse der Modellgenerierung, deren Prozessschritte in den Hauptszenarien verankert sind, und der Verkehrssicherheitsanalysen werden in Folge dargelegt.

6.1 Zusammenfassung Modellgenerierung

Im Ausgangsszenario der Wickenburggasse mit der Bezeichnung REF V0 sind nach ersten Analysen der verkehrlichen Kenngrößen Abweichungen zu verzeichnen, die in weiterer Folge behoben werden. Erste Ergebnissen der Konflikte zeigen, dass Rear-End-Konflikte für die Gesamtanzahl maßgebend sind und vorrangig in den Wartebereichen an signalisierten Knotenpunkten auftreten. Durch eine erste Parameterstudie hinsichtlich Simulationsfrequenz konnte diese für weitere Untersuchungen mit einer Frequenz von 10 Hz festgelegt werden. Ebenso wurde die Reisezeit in der Simulation über eine Reduktion der Maximal- und Wunschbeschleunigungen verringert und daraus das Szenario REF V1 entwickelt. Wesentliche Veränderungen, die im Zuge der Vorbereitung des Modells umgesetzt werden, betreffen Vorrangregelungen, VLSA und Geometrie und sind in Szenario REF V2 implementiert. Positiv beeinflusst ist dadurch vor allem die Verkehrsstärke, da das Fehlermaß an allen Querschnitten eingehalten wird. Durch die Überarbeitung der sicherheitsrelevanten Modellgenauigkeiten konnten in Folge die Konflikte um 14 % reduziert sowie der Wertebereich der Konfliktkenngrößen angehoben und damit die Konfliktschwere verringert werden. Letztendlich wurde eine Netzerweiterung über den Lendplatz in Richtung Keplerstraße durchgeführt, die vorrangig zur Untersuchung des Fahrradverkehrs dient. Dafür werden Strecken, Zuflüsse und Routen für den motorisierten und Fahrradverkehr erstellt und adaptiert sowie zusätzliche VLSA am Lendplatz und an der Neubaugasse implementiert. Damit ist die Erstellung der vier Hauptszenarien und folglich die Generierung eines Basismodells für weitere sicherheitsspezifische Detailuntersuchungen abgeschlossen.

6.2 Zusammenfassung Verkehrssicherheitsanalysen

Die Themenbereiche bezüglich der Verkehrssicherheit umfassen eine Untersuchung ausgewählter Parameter und deren Kombinationen, die Sichtweitenproblematik und die Fahrdynamik.

Die Ergebnisse hinsichtlich Fahrdynamik zeigen, dass insbesondere die Wahl des Wiedemann Folge-modells einen wesentlichen Einfluss auf die Konfliktgenerierung hat, das sich in einer um 85 % größeren Konfliktdanzahl ausdrückt. Durch die Variation der einzelnen Parameter werden die Konflikte hingegen bedingt beeinflusst. Von den 13 untersuchten Parametern weisen lediglich 6 signifikante Veränderungen hinsichtlich der Konfliktdanzahl auf. Auffallend ist dabei, dass sich nicht nur annähernd lineare, sondern auch kurvenförmige Verläufe ergeben, wie beispielsweise bei CC1. Für den Fahrradverkehr werden auf Basis einer Verkehrszählung Zuflüsse und Routen adaptiert sowie das Fahrverhalten bezüglich Wunschgeschwindigkeiten und Folgeparameter variiert. Die Reduktion der Rear-End-Konflikte um 79 % bestätigen die Notwendigkeit, für Radverkehrsstudien eine entsprechende Parametrierung des Fahrverhaltens vorzunehmen. Die Konflikte treten in diesem Szenario nur

noch in den Wartebereichen der signalisierten Knotenpunkte auf und führt damit zu einer ähnlichen Verortung wie im motorisierten Verkehr. Aufbauend auf diesem Szenario wird auch das nicht regelkonforme Verhalten untersucht, wobei hier das Augenmerk auf Unaufmerksamkeit und Rotlichtmissachtung gelegt wird. Durch die Parametrisierung ergeben sich im motorisierten Verkehr um 22 % mehr Rear-End-Konflikte mit einer Tendenz zu schweren Konflikten. Während die Unaufmerksamkeit im gesamten Netz zu einer höheren Dichte in den bereits mit Konflikten durchzogenen Wartebereichen an den signalisierten Knotenpunkten führt, ergibt sich durch die Rotlichtmissachtung ein zusätzliches Konfliktpotenzial, durch das in bislang konfliktfreien lokal begrenzten Zonen neue Konflikte generiert werden. Für die Analyse der Zuflusserhöhung wird als Untersuchungsgebiet nur der Bereich der Wickenburggasse herangezogen und mittels einer Adaptierung von Routenentscheidungen und VLSA ein um etwa 50 % höheres Verkehrsaufkommen implementiert. Hervorgerufen durch die Rear-End-Konflikte ergibt sich insgesamt eine Konfliktsteigerung von 22 %, wobei die Verteilungen der Konfliktkenngrößen annähernd gleich bleiben.

Die letzten beiden Studien umfassen lokale Untersuchungen am Knoten Laimburggasse/Wickenburggasse, wobei die Parametrierung von Konfliktflächen und Langsamfahrbereichen im Vordergrund steht. Für die Analyse der Sichtweitenproblematik wird zunächst ein Einzelkonflikt mittels Fahrzeugtrajektorien untersucht. Das Ergebnis ist nicht nur eine Auflösung des Konfliktes, sondern führt auch zu einem gleichmäßigeren Bewegungsverlauf bei beiden Simulationsfahrzeugen. Zusätzlich wird anhand aller Fahrzeuge auf dem betroffenen Streckensegment der Einfluss der Parametrierung hinsichtlich der Annäherungsgeschwindigkeit an den Knoten untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass ein an den lokalen Sichtverhältnissen angepasstes Annäherungsverhalten insbesondere über die Langsamfahrbereiche, aber auch über die Konfliktflächen erzielt werden kann. Anhand der lokalen Betrachtung ist ersichtlich, dass sich insgesamt die Crossing-Konflikte durch die Parametrierung der beiden Netzelemente reduzieren. Im querenden Verkehr ergeben sich hingegen neue Konflikte und unterstreichen damit die Notwendigkeit, lokale Anpassungen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das gesamte Netz zu überprüfen. Die letzte Untersuchung betrifft die Fahrdynamik, die vor allem in Kurvenfahrten eine Rolle spielt. Hierfür wird bei einer Parametrierung von Langsamfahrbereichen angesetzt und als Referenzwerte Höchstgeschwindigkeiten für unterschiedliche Bodenbeschaffenheiten und Witterungsverhältnisse in Abhängigkeit des Kurvenradius ermittelt. Wird von einer trockenen Fahrbahn ausgegangen, so reicht lediglich bei einem Verbinder der bereits vorhandene Langsamfahrbereich nicht aus, dass die Simulationsfahrzeuge zumindest bei trockener Fahrbahn die höchstmögliche Kurvengeschwindigkeit unterschreiten. Anhand einer Reduktion der Wunschgeschwindigkeitsverteilung in Kombination mit einer Verlängerung des Bereiches wird ein an die geometrischen Gegebenheiten angepasstes Fahrverhalten simuliert und die Geschwindigkeit der Fahrzeuge soweit reduziert, dass ein gefahrloses Passieren der Kurve möglich ist.

6.3 Ausblick

Die hier durchgeführte Studie liefert einen wesentlichen Beitrag zur Kalibrierung mikroskopischer Verkehrsflussmodelle, insbesondere hinsichtlich Verkehrssicherheitsanalysen. Die Ergebnisse bestätigen, dass diese ein höheres Genauigkeitsniveau hinsichtlich der Fahrzeugtrajektorien verlangen und geben Auskunft über wesentliche Modellierungsaspekte dafür. Der Anwendungsbereich der Erkenntnisse dieser Studie ist allerdings nicht nur auf verkehrssicherheitsspezifische Fragestellungen begrenzt, sondern führt durch eine detaillierte Anpassung der Trajektorien zu einer besseren Annäherung an reale Verhältnisse und bietet damit Optimierungschancen für die Kalibrierung mikroskopischer Verkehrsflussmodelle im Allgemeinen. Kombiniert mit den zusätzlichen Parameterstudien richtet sich die Studie

nicht nur an VISSIM Anwender, sondern auch an unterschiedliche Interessensgruppen, die in die Diskussion zu verkehrssicherheitspezifischen Themenbereichen verstärkt eingebunden sind.

Zusammengefasst ergeben sich für die Kalibrierung mikroskopischer Verkehrsflussmodelle hinsichtlich der Verkehrssicherheit unter Berücksichtigung verkehrlicher Daten sich aus den Ergebnissen folgende Konsequenzen:

- **Sensitivität:** Die empfindlichere Reaktion von Konfliktkenngrößen auf Einstellungen von einzelnen Parametern kann anhand dieser Studie bestätigt werden. Davon betroffen sind nicht nur Fahrverhaltensparameter, sondern dies zeigt sich auch bei Simulationsparametern. Fälle, in denen wesentliche Veränderungen nur bei verkehrlichen, aber nicht bei Konfliktkenngrößen zu beobachten sind, haben sich nur sehr vereinzelt ergeben.
- **Geometrie:** Um das Genauigkeitsniveau der Fahrzeugtrajektorien zu erhöhen, ist eine detaillierte Anpassung der Geometrie in der Ebene und in der Höhe grundlegend. Ihr ist somit bei Verkehrssicherheitsanalysen ein größerer Stellenwert in der Modellierung einzuräumen, allerdings ist dabei der Arbeitsaufwand in einem vertretbaren Rahmen zu halten.
- **Fahrverhaltensparameter:** Die Wahl des Folgemodells beeinflusst die Konfliktkenngrößen, insbesondere die Anzahl maßgeblich. Hingegen werden durch Variation einzelner Parameter in den meisten Fällen nur geringe Veränderungen bezüglich verkehrlicher und Konfliktkenngrößen hervorgerufen. Ebenso wirkt sich die Wahl der Maximal- und Wunschbeschleunigungsverteilung nur in gering aus.
- **Fahrradverkehr:** Für die Untersuchung von Fahrradverkehrskonflikten ist eine Adaptierung der Fahrverhaltensparameter notwendig, da sich diese in den Defaulteinstellungen stark an Eigenschaften des MIV orientieren. Auch die Wahl der Wunschgeschwindigkeit, eventuell mit Berücksichtigung der Steigung, kann einen erheblichen Einfluss auf die Generierung von Konflikten nach sich ziehen.
- **Nicht Regelkonformes Verhalten:** Ein entscheidender Risikofaktor ist die Unaufmerksamkeit, der bislang wenig Bedeutung beigemessen wurde. Die Tatsache, dass sie eine nicht zu vernachlässigende Komponente in der Verkehrssicherheitsanalyse ist, drückt sich nicht nur in Unfallzahlen aus, sondern zeigt sich auch in der deutlichen Konfliktsteigerung im Modell. Ebenso werden durch implementierte Rotlichtmissachtungen neue Konflikte generiert und können aufgrund ihres begrenzten Wirkungsradius in eine direkte Ursache-Wirkung-Beziehung gesetzt werden.
- **Sichtweiten:** Zur Analyse unzureichender Sichtverhältnisse an Knotenpunkten eignet sich die Parametrierung einzelner Netzelemente, insbesondere von Konfliktflächen und Langsamfahrbereichen. Konflikte, die auf ein den Sichtverhältnissen unangepasstes Fahrverhalten der Simulationsfahrzeuge zurückzuführen sind, können damit reduziert und ein realeres Annäherungsverhalten modelliert werden. Zu beachten ist dabei, dass aus den lokalen Veränderungen sich keine negativen Auswirkungen auf das gesamte Netz ergeben.
- **Fahrdynamik:** Der Einsatz von Langsamfahrbereichen in Kurvenfahrten ist ein durchaus gängiges Verfahren in der Verkehrsflussmodellierung. Zur Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit in diesen Langsamfahrbereichen sind meist angenäherte Werte ausreichend und eine korrekte Berechnung für jede Kurve nicht zielführend. Dies bestätigt sich auch an dem hier untersuchten Knotenpunkt, da lediglich auf einem Streckensegment Überschreitungen der Höchstgeschwindigkeit auftreten. Allerdings kann eine detaillierte Parametrierung für Verkehrssicherheitsanalysen unterschiedlichen Witterungsverhältnissen durchaus sinnvoll sein.

Diese Ergebnisse liefern einen wichtigen Beitrag für die Kalibrierung für Verkehrssicherheitsanalysen, allerdings sind weitere Untersuchungen notwendig. Die hier vorgestellten Studien geben nur einen Überblick über Kalibrierungsmöglichkeiten, ohne dabei in die Tiefe zu gehen. Detailstudien zu einzelnen Themenbereichen sind in jedem Fall anzudenken, um Variationen der Parametrierung zu untersuchen. So kann beispielsweise eine isolierte Betrachtung einzelner Parameter des nicht regelkonformen Verhaltens oder bezüglich des Fahrradverkehrs zielführend sein. Die hier vorgelegten Ergebnisse der Verkehrssicherheit basieren auf reinen Parameterstudien ohne einen Vergleich mit realen Konflikten oder einer Anwendung in anderen Simulationsmodellen. Aus diesem Grund sind weitere Studien zur Kalibrierung und Validierung dieser Ergebnisse notwendig. Letztendlich ist eine Integration von Fahrerassistenzsystemen in Zusammenhang mit den hier gewonnenen Erkenntnissen zu stellen. Diese bieten großes Potenzial, menschliche Fehler und Wahrnehmungseinschränkungen zu kompensieren und liefern damit einen wertvollen Beitrag zur Verkehrssicherheit. Aus diesem Grund sind Fahrerassistenzsysteme für die Entwicklung einer zukunftssträchtigen Kalibrierungsmethodik für Verkehrssicherheitsanalysen unbedingt miteinzubeziehen.

7 Literaturverzeichnis

Agarwal, N. K. (2011): Estimation of pedestrian safety at intersections using simulation. Dissertation. University of Kentucky. Lexington, USA.

Archer, J. (2005): Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling. A study of urban and suburban intersections. Dissertation. Royal Institute of technology. Stockholm.

Astarita, V.; Giofré, V. P. (2019): From traffic conflict simulation to traffic crash simulation: Introducing traffic safety indicators based on the explicit simulation of potential driver errors. In: Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 94, pp. 215–236.

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) (2017): Verkehrssicherheit in Österreich. Jahresbericht 2016. Wien.

Burg, H. (2017): Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion. Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation. Springer. Wiesbaden. 3. Aufl.

Chin, H.-C.; Quek, S.-T. (1997): Measurement of traffic conflicts. In: Safety Science, 26, Vol. 3, pp. 169–185.

Cunto, F.; Saccomanno, F. (2008): Calibration and validation of simulated vehicle safety performance at signalized intersections. In: Accident Analysis & Prevention, 40, Vol. 3, pp. 1171–1179.

Detering, S. (2011): Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen zur Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen. Dissertation. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Braunschweig.

Dr. Steffan Datentechnik GmbH (DSD) (2013): PC-Crash user manual. Ein Simulationsprogramm für Verkehrsunfälle Bedienungs- und technisches Handbuch. Linz.

Europäische Kommission (2001): Weissbuch - die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft. Amt für Amtliche Veröff. der Europ. Gemeinschaften. Brüssel.

Europäische Kommission (2011): Weißbuch zum Verkehr. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum, hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. Amt für Veröff. der Europ. Union. Luxemburg.

Europäische Kommission (2018): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Europa in Bewegung: Nachhaltige Mobilität für Europa: sicher, vernetzt und umweltfreundlich.

Fellendorf, M.; Vortisch, P. (2010): Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. In: Barceló, J. (Hrsg.). Fundamentals of Traffic Simulation, Springer Science+Business Media LLC, New York, NY, 63–93.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2006): Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Grundlagen und Anwendungen. FGSV-Verl. Köln. Ausg. 2006.

Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV). RVS 02.02.22: Verkehrskonfliktuntersuchung, Wien, 1995.

Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV). RVS 03.05.12: Plangleiche Knoten -Kreuzungen, T-Kreuzungen, Wien, 2007.

- Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV). RVS 02.02.33: Road Safety Audit, Wien, 2012.
- Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV). RVS 02.02.34: Road Safety Inspection, Wien, 2012.
- Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV). RVS 02.02.21: Verkehrssicherheitsuntersuchung, Wien, 2014.
- Gettman, D.; Head, L. (2003): Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models. Final Report. FHWA-RD-03-050. McLean, USA.
- Gettman, D.; Pu, L.; Sayed, T. et al. (2008): Surrogate Safety Assessment Model and Validation. Final Report. FHWA-HRT-08-051. Tucson, USA.
- Gipps, P. G. (1986): A model for the structure of lane-changing decisions. In: Transportation Research Part B: Methodological, 20, Vol. 5, pp. 403–414.
- Grayson, G. B.; Hydén, C.; Kraay, J. H. et al. (1984): The Malmö Study. A Calibration of Traffic Conflict Techniques. Leidschendam, Netherlands.
- Haberl, M.; Fellendorf, M.; Kolk, H. et al. (2018): Simulation Assisted Safety Impact Analyses for Signalized Urban Intersections. Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018. Vienna, Austria.
- Habtemichael, F. G.; de Picado-Santos, L. (2013): Sensitivity Analysis of VISSIM Driver Behavior Parameters on Safety of Simulated Vehicles and Their Interaction with Operations of Simulated Traffic. Submitted for Presentation and Publication at the 92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC, USA.
- Hayward, J. C. (1972): Near-Miss Determination Through Use of a Scale of Danger. Report No. HRR 384.
- Hebenstreit, C.; Fellendorf, M. (2018): Multi-and intermodal Trip Chain Simulation for individual daily Routines, using Bicycles. Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018. Vienna, Austria.
- Hirschmann, K.; Zallinger, M.; Fellendorf, M. et al. (2009): GAVe – Grazer adaptive Verkehrssteuerung. I2 - Intelligente Infrastruktur. Endbericht.
- Hoffmann, S. (2013): Mikroskopische Modellierung und Bewertung von verkehrssicherheitskritischen Situationen. Am Beispiel kommunikationsbasierter Fahrerwarnungen auf Autobahnen. Dissertation. Technische Universität München. München.
- Huang, F.; Liu, P.; Yu, H.; Wang, W. (2013): Identifying if VISSIM simulation model and SSAM provide reasonable estimates for field measured traffic conflicts at signalized intersections. In: Accident Analysis & Prevention, Vol. 50, pp. 1014–1024.
- Hupfer, C. (1997): Computergestützte Videobildverarbeitung zur Verkehrssicherheitsarbeit. Am Beispiel von Fußgängerquerungen an städtischen Hauptverkehrsstraßen. Fachgebiet Verkehrswesen Univ. Kaiserslautern. Kaiserslautern.
- Hydén, C. (1987): The Development of a Method for Traffic Safety Evaluation. The Swedish Traffic Conflicts Technique. Dissertation. Lund University. Lund, Sweden.
- Hydén, C. (1996): Traffic conflicts technique-state of the art. In: Topp, H. H. (Hrsg.). Traffic safety work with video processing, Fachgebiet Verkehrswesen, Univ, Kaiserslautern.

Literaturverzeichnis

ibv Fallast (2015): VLSA 503 Knoten Bergmanngasse/Humboldtstraße. Adaptierung des signalprojekts für den Bestand. Graz.

Kuratorium für Verkehrssicherheit (KfV) (2014): Unfallgeschehen & Sicherheitsmanagement auf Österreichs Autobahnen. ZVÖ-Fachtagung. Wien.

Langenberg, J. (2015): Auslegung, Simulation und Bewertung von Verkehrsassistenzsystemen durch die Kopplung mit Verkehrsflussmodellen. Dissertation. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Braunschweig.

Lohse, D.; Schnabel, W. (2011): Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 1 Straßenverkehrstechnik. Beuth Verlag GmbH. s.l. 3. Aufl.

Manjunatha, P.; Vortisch, P.; Mathew, T. (2013): Methodology for the Calibration of VISSIM in Mixed Traffic. Washington DC, USA.

McNamara, M. (2014): Development of an Interdisciplinary Simulation Environment for Traffic Safety Modeling. Masterthesis. University of Virginia. Charlottesville, USA.

Miller, D. M. (2009): Developing a Procedure to Identify Parameters for Calibration of a VISSIM Model. Master Thesis. Georgia Institute of Technology. Atlanta, USA.

Park, B.; Qi, H. (2005): Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1934, pp. 208–217.

Park, B.; Schneeberger, J. D. (2003): Microscopic Simulation Model Calibration and Validation. Case Study of VISSIM Simulation Model for a Coordinated Actuated Signal System. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1856, pp. 185–192.

Park, B.; Won, J. (2006): Microscopic Simulation Model Calibration and Validation Handbook. FHWA/VTRC 07-CR6. Charlottesville, USA.

Perkins, S. R.; Harris, J. I. (1968): Traffic Conflict Characteristics: Accident potential at intersections. In: Highway Research Record, Vol. 225, pp. 45–143.

PTV (2016): PTV VISSIM 9 Benutzerhandbuch. Karlsruhe.

PTV (2017): PTV VISSIM 10 Benutzerhandbuch. Karlsruhe.

Pu, L.; Joshi, R. (2008): Surrogate Safety Assessment Model (SSAM). Software User manual. FHWA-HRt-08-050. Tucson, USA.

Qiao, G.; Menendez, M.; Axhausen, K. W. (2012): Sensitivity Analysis for Calibrating VISSIM in Modeling the Zürich network. From theory to implementation. 12th Swiss Transport Research Conference 2012. Monte Verità, Ascona.

Rose, C.; Eichinger-Vill, E. M. (2010): Die Umsetzung der EU-Richtlinie über ein Sicherheitsmanagement für die Straßenverkehrsinfrastruktur in Österreich. In: Zeitschrift für Verkehrsrecht, Vol. 221, pp. 448–451.

Sayed, T.; Brown, G.; Navis, F. (1994): Simulation of Traffic Conflicts at Unsignalized Intersections with TSC-Sim. In: Accident Analysis & Prevention, Vol. 26, pp. 593–607.

Schnieder, E.; Schnieder, L. (2013): Verkehrssicherheit. Maße und Modelle, Methoden und Maßnahmen für den Straßen- und Schienenverkehr. Springer. Dordrecht.

Sparmann, U. (1978): Spurwechselfvorgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen. Bundesmin. f. Verkehr Abt. Straßenbau. Bonn-Bad Godesberg.

Stadt Graz (2019): Rad-Zählstellen. Online verfügbar unter: https://www.graz.at/cms/beitrag/10116349/8032890/Rad_Zaehlstellen.html [04.07.2019].

Statistik Austria (2019): Verkehrsstatistik. Jahresergebnisse 2018. Straßenverkehrsunfälle mit Personenschaden.

Tørslev, N.; Albrink, R. (2013): Micro Simulation of cyclists. Velo City 2013. Vienna, Austria.

United Nations Department for Safety and Security (UNDSS) (2018): Road Safety Strategy. For the United Nations System and its Personnel. A Partnership for Safer Journeys.

Wiedemann, R. (1974): Simulation des Straßenverkehrsflusses. Universität Karlsruhe. Karlsruhe.

Wisconsin Department of Transportation (2018): Traffic Engineering, Operations and Safety Manual. Madison, USA.

Wu, J.; Radwan, E.; Abou-Senna, H. (2016): Pedestrian-vehicle conflict analysis at signalized intersections using microsimulation. 17th International Conference Road Safety On Five Continents (RS5C 2016). Rio de Janeiro, Brazil.

Young, W.; Sobhani, A.; Lenné, M. G.; Sarvi, M. (2014): Simulation of safety: a review of the state of the art in road safety simulation modelling. In: Accident; analysis and prevention, Vol. 66, pp. 89–103.

Yu, M.; Fan, W. (2017): Calibration of microscopic traffic simulation models using metaheuristic algorithms. In: International Journal of Transportation Science and Technology, 6, Vol. 1, pp. 63–77.

8 Anhang

8.1 Ergebnisse

8.1.1 Verkehrsbelastung

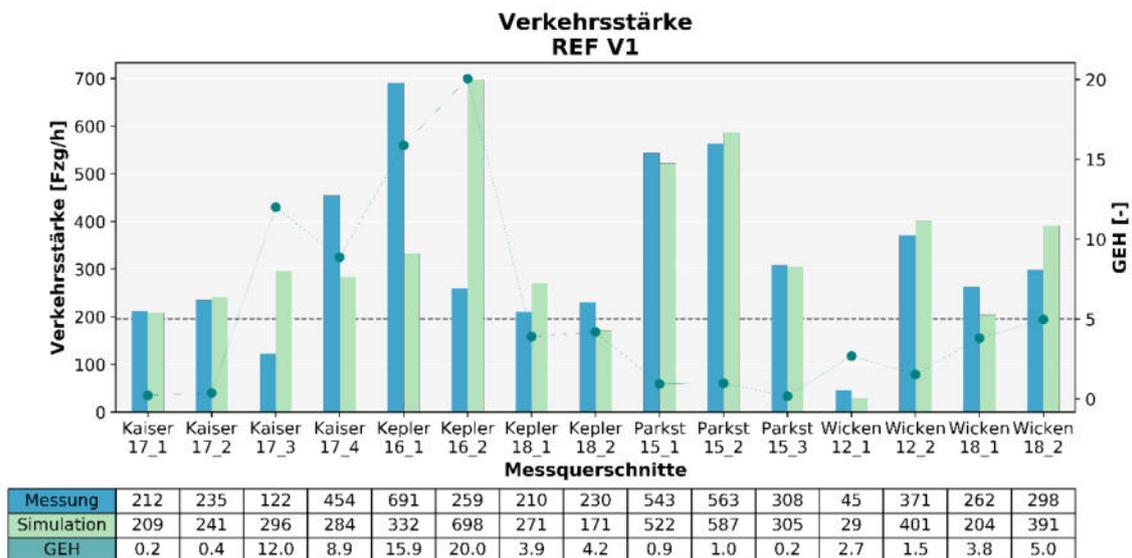


Abbildung 121: REF V1 - Vergleich Messung und Simulation der Verkehrsstärke mit GEH-Fehlermaß

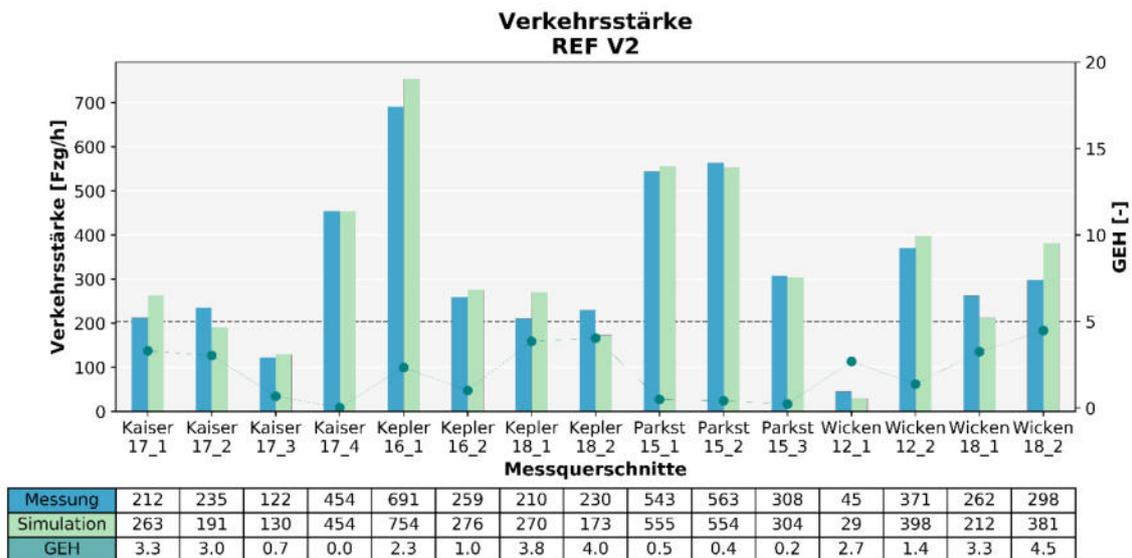


Abbildung 122: REF V2 - Vergleich Messung und Simulation der Verkehrsstärke mit GEH-Fehlermaß

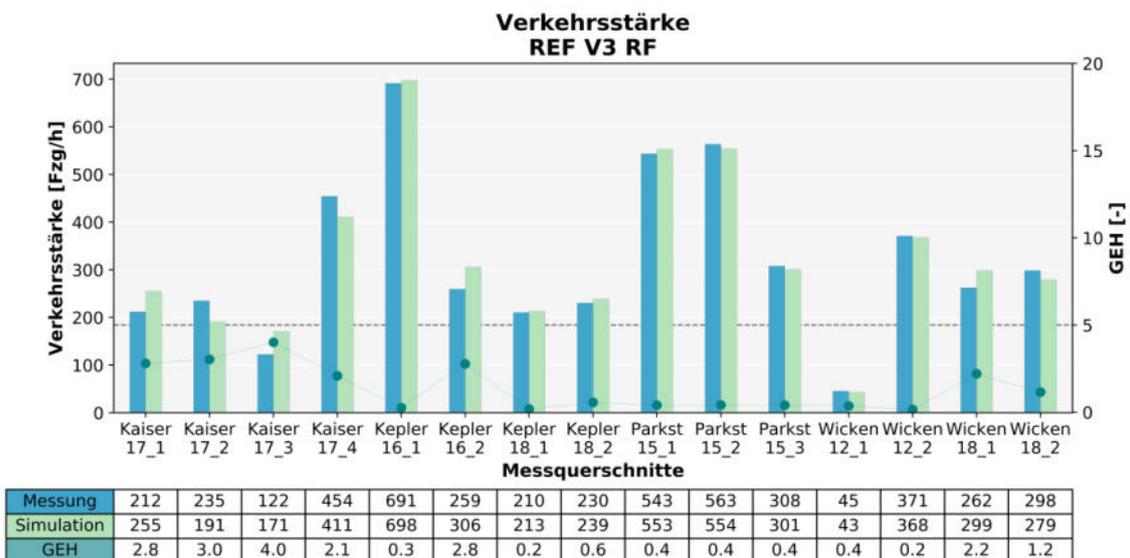


Abbildung 123: REF V3 RF (Fahradverkehr) - Vergleich Messung und Simulation der Verkehrsstärke mit GEH-Fehlermaß

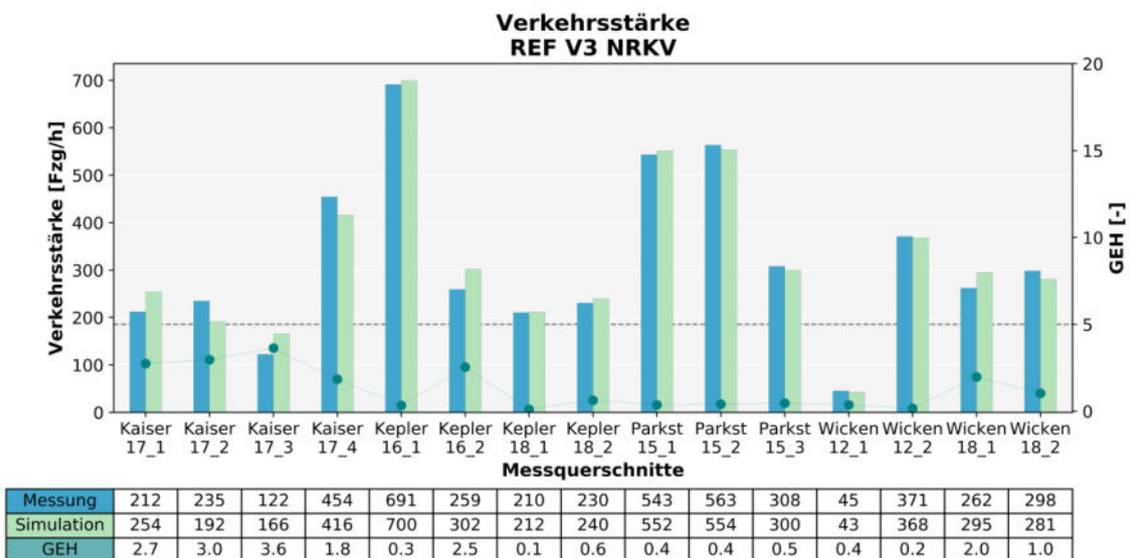


Abbildung 124: REF V3 NRKV (Nicht regelkonformes Verhalten) - Vergleich Messung und Simulation der Verkehrsstärke mit GEH-Fehlermaß

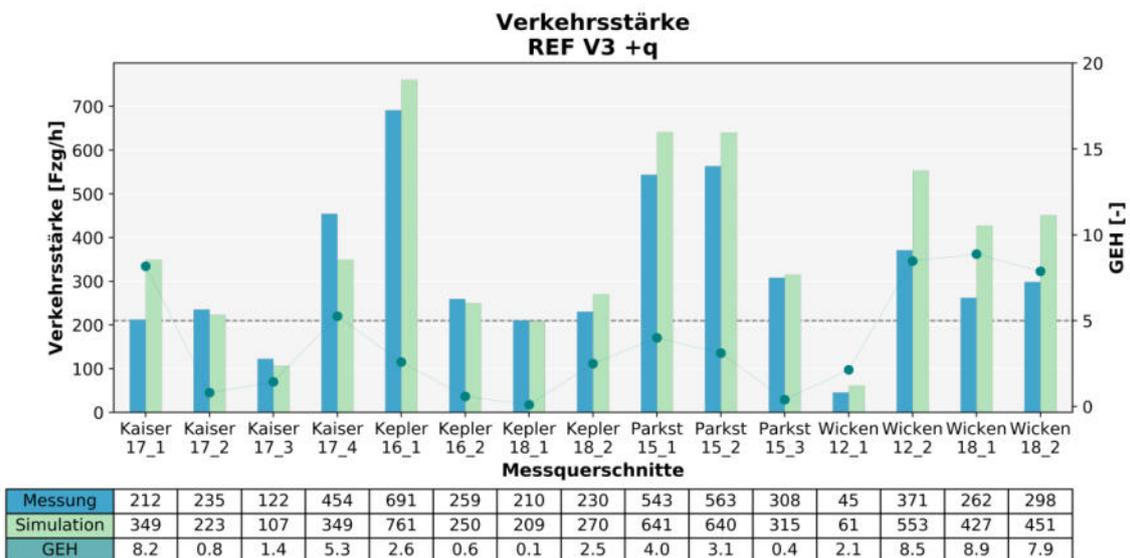


Abbildung 125: REF V3 +q (Zufusserhöhung) - Vergleich Messung und Simulation der Verkehrsstärke mit GEH-Fehlermaß

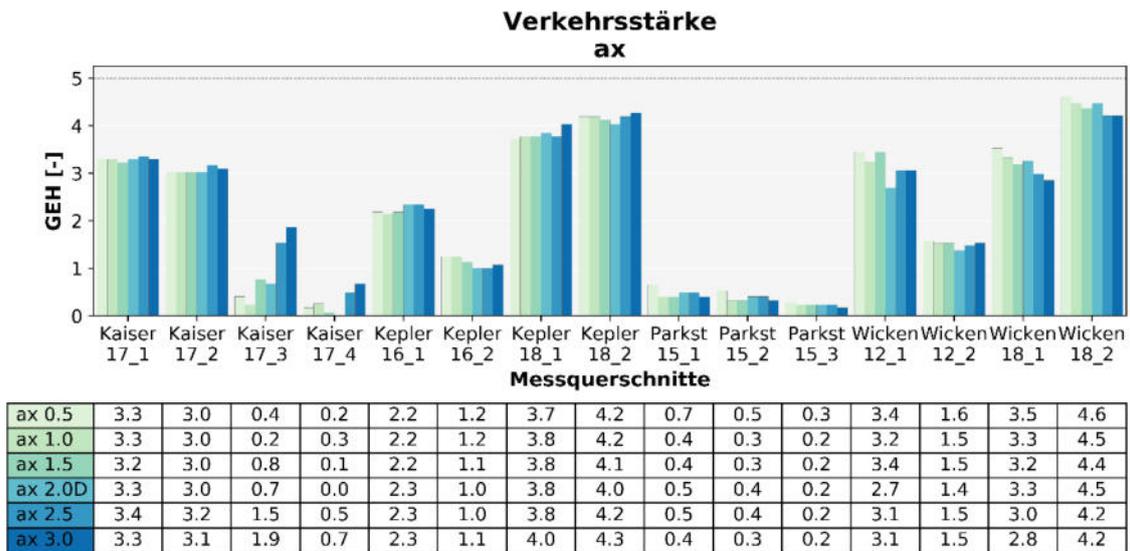


Abbildung 126: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation ax

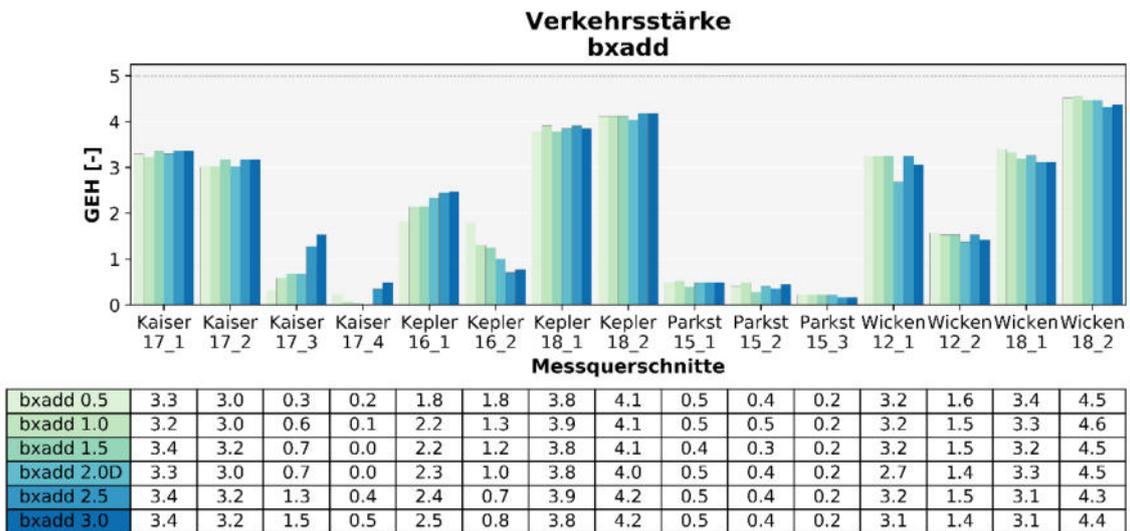


Abbildung 127: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation bxadd

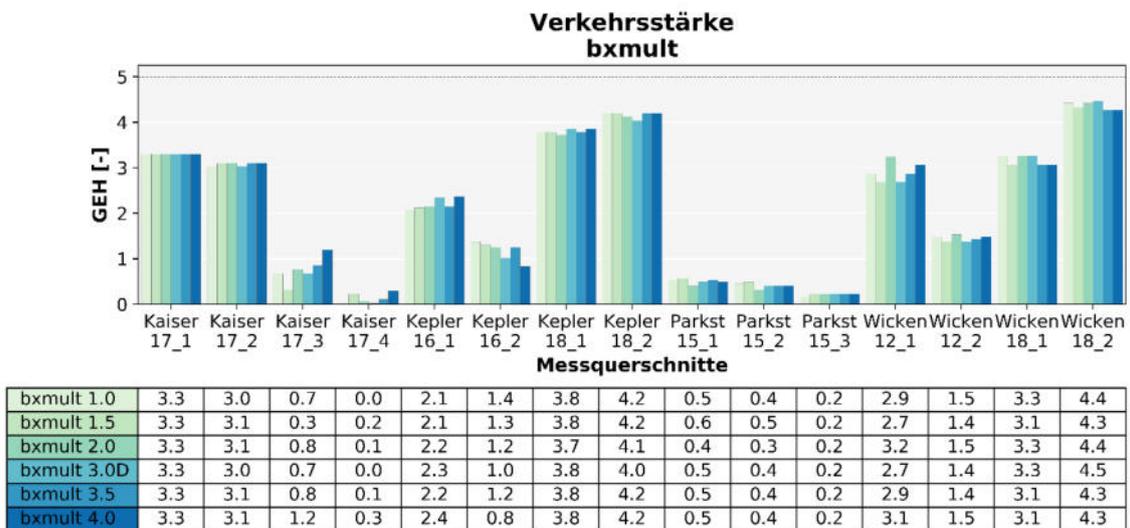


Abbildung 128: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation bxmult

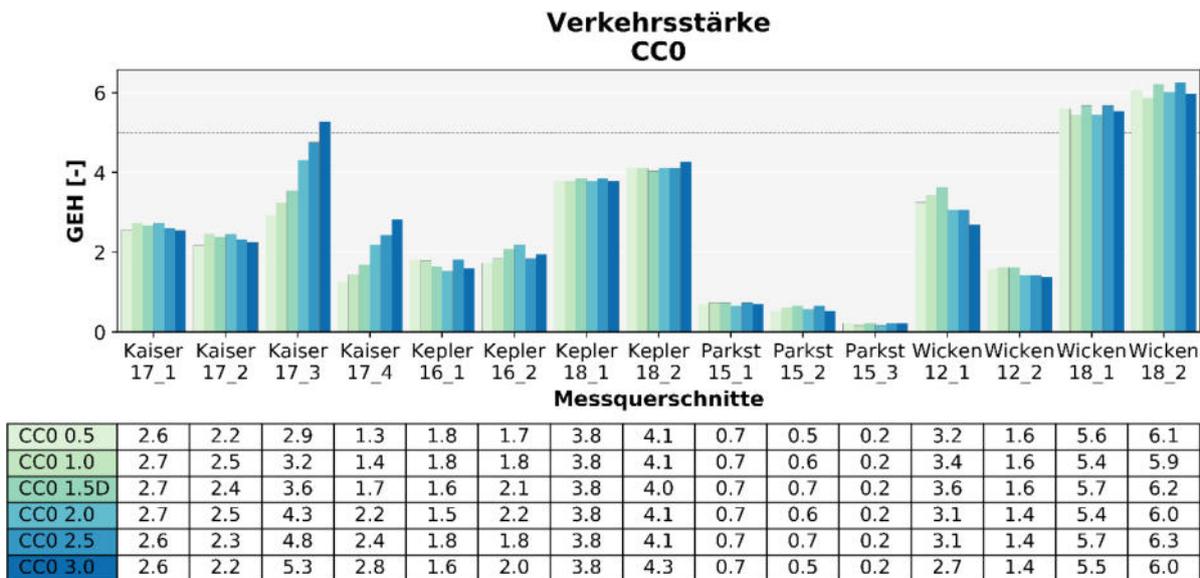


Abbildung 129: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CC0

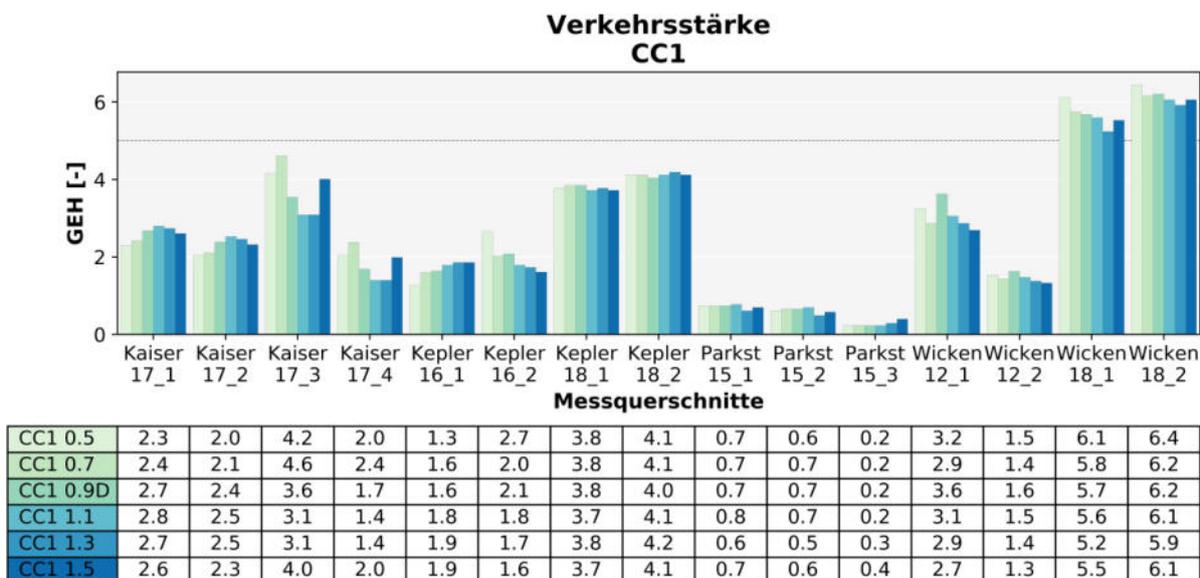


Abbildung 130: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CC1

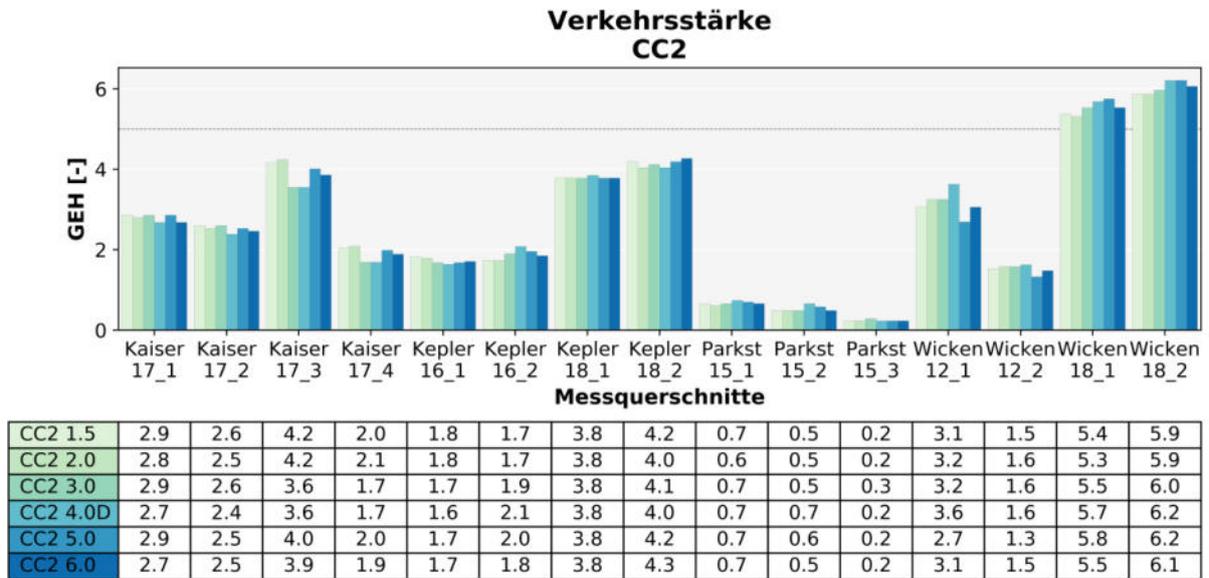


Abbildung 131: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CC2

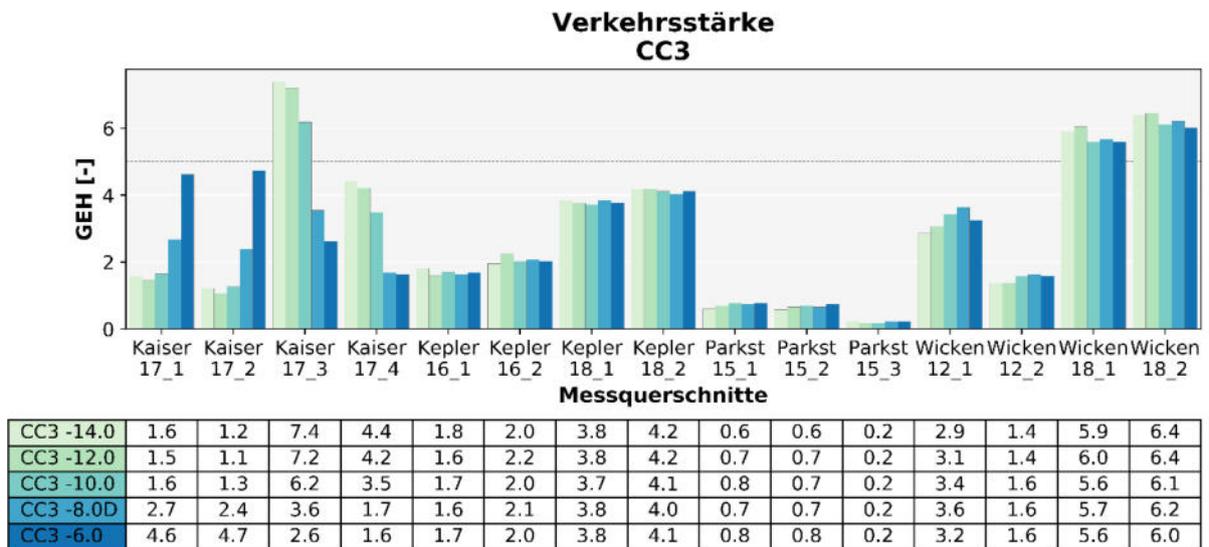


Abbildung 132: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CC3

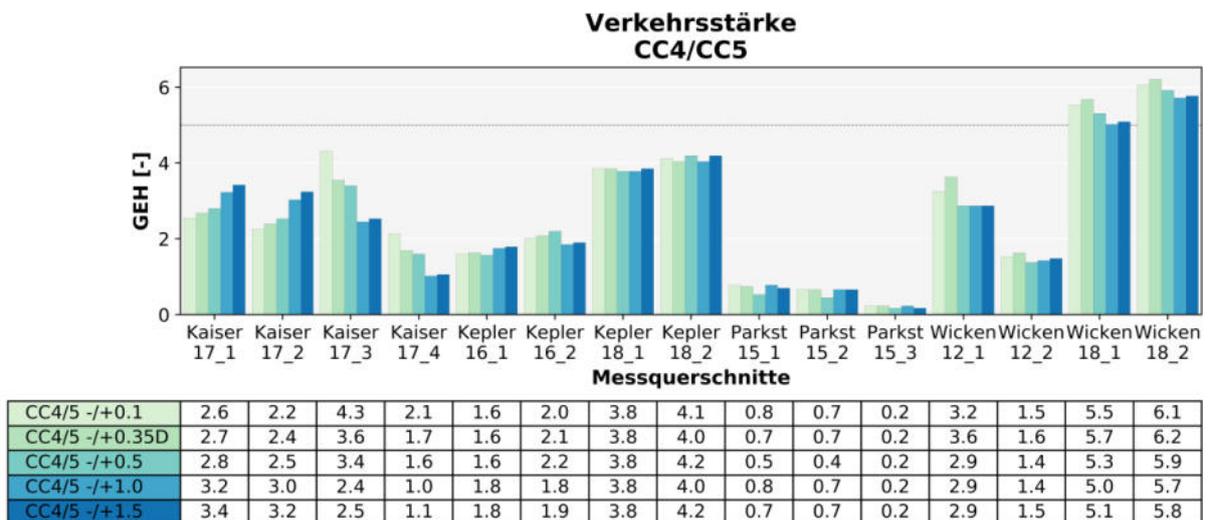


Abbildung 133: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CC4/CC5

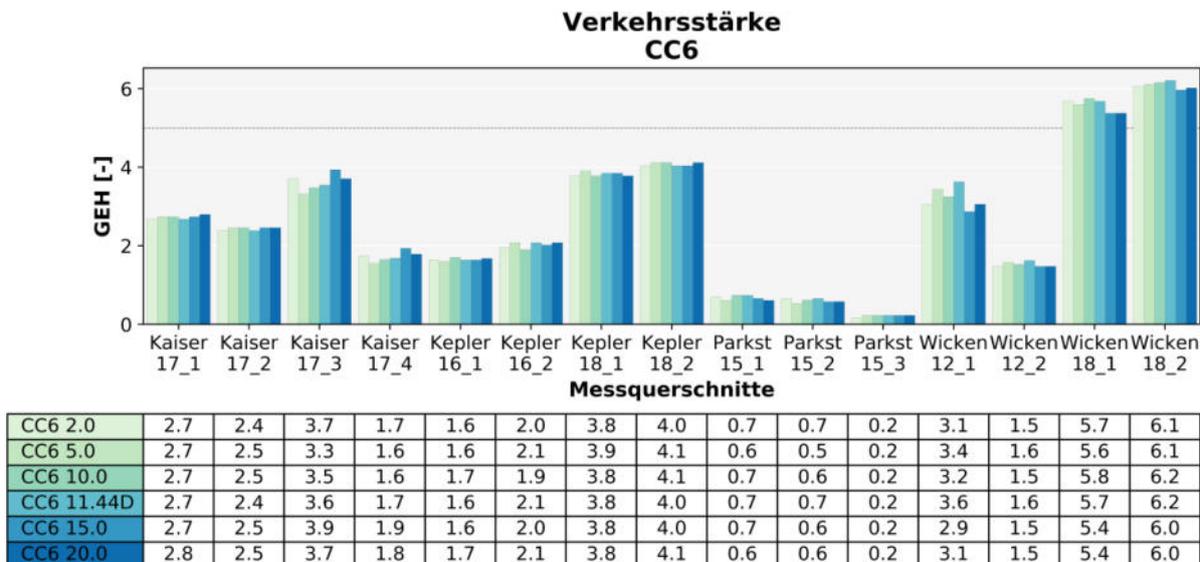


Abbildung 134: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CC6

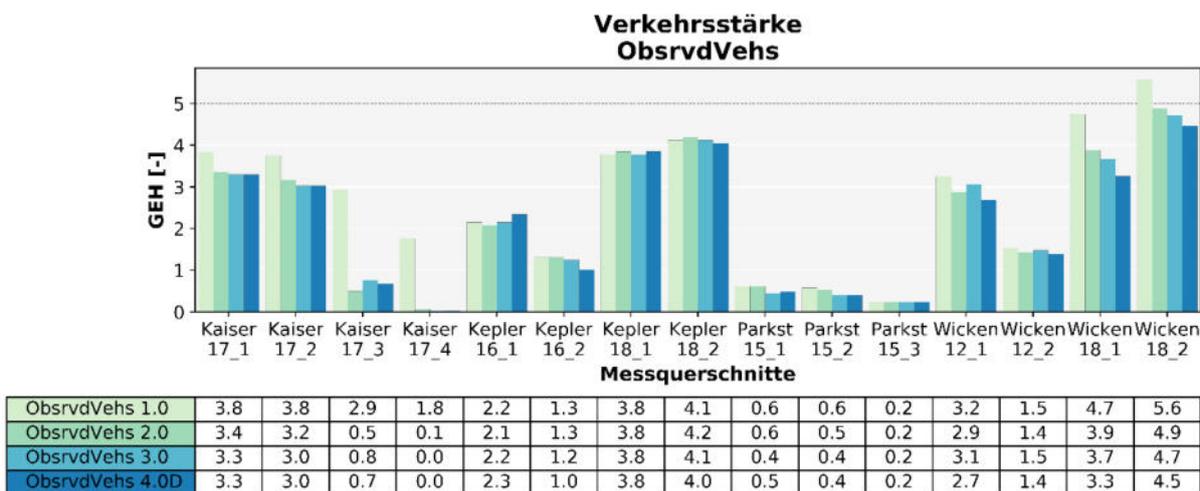


Abbildung 135: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation ObsrvdVehs

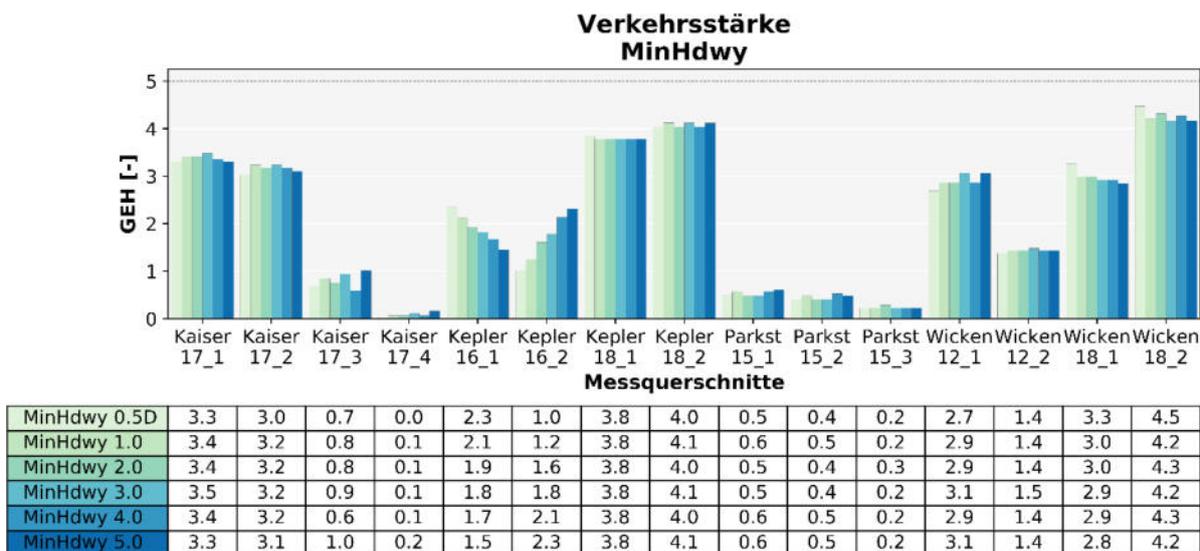


Abbildung 136: REF V2 - Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation MinHdwy

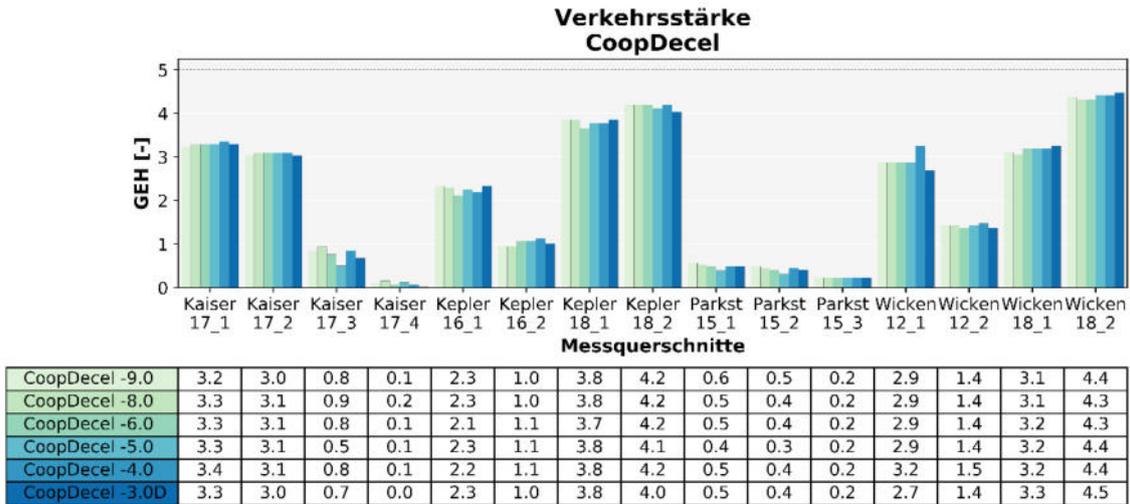


Abbildung 137: Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation CoopDecel

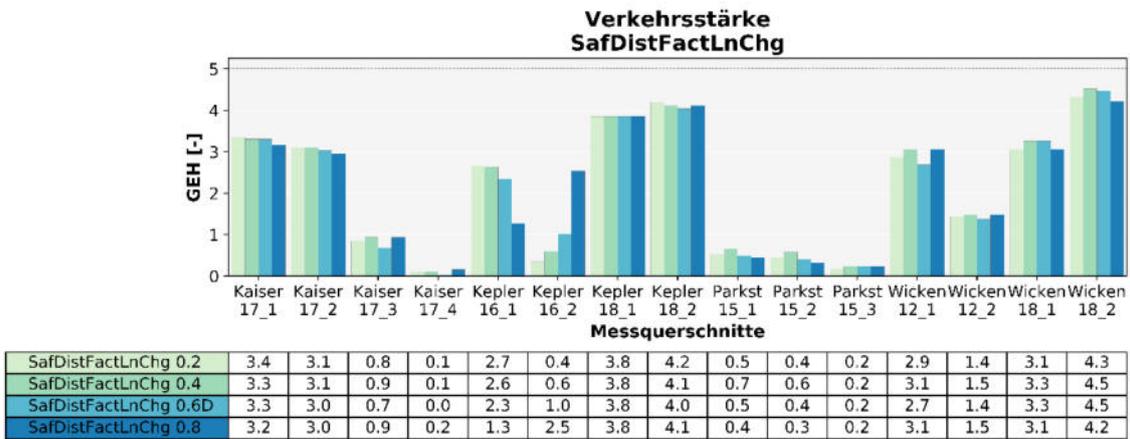


Abbildung 138: Vergleich GEH-Fehlermaß mit Parametervariation SafDistFactLnChg

8.1.2 Reisezeit

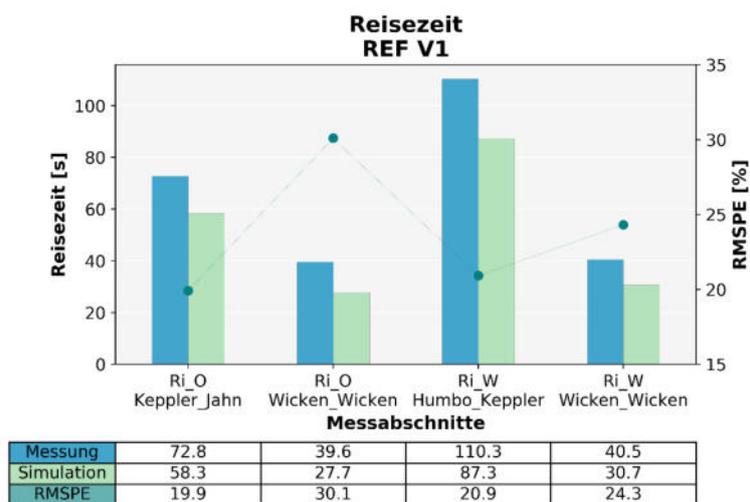


Abbildung 139: REF V1 - Vergleich Messung und Simulation der Reisezeit mit RMSPE-Fehlermaß

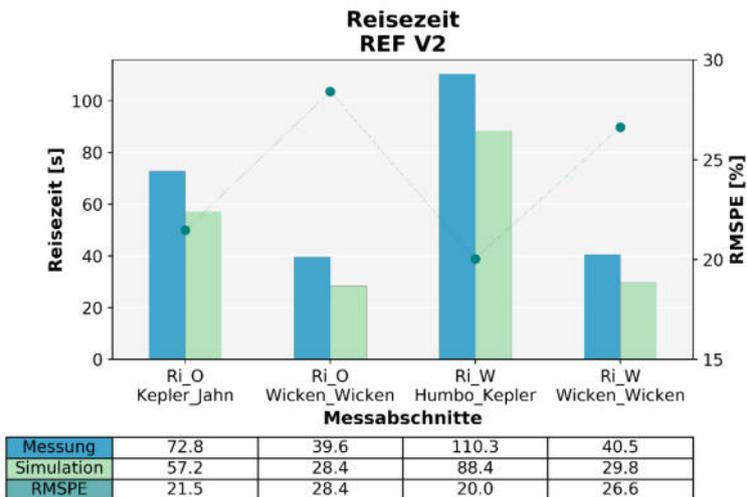


Abbildung 140: REF V2 - Vergleich Messung und Simulation der Reisezeit mit RMSPE-Fehlermaß

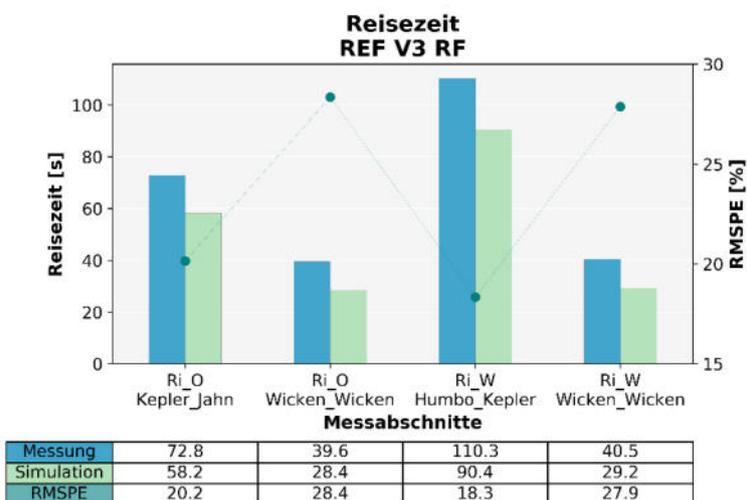


Abbildung 141: REF V3 RF (Fahradverkehr) - Vergleich Messung und Simulation der Reisezeit mit RMSPE-Fehlermaß

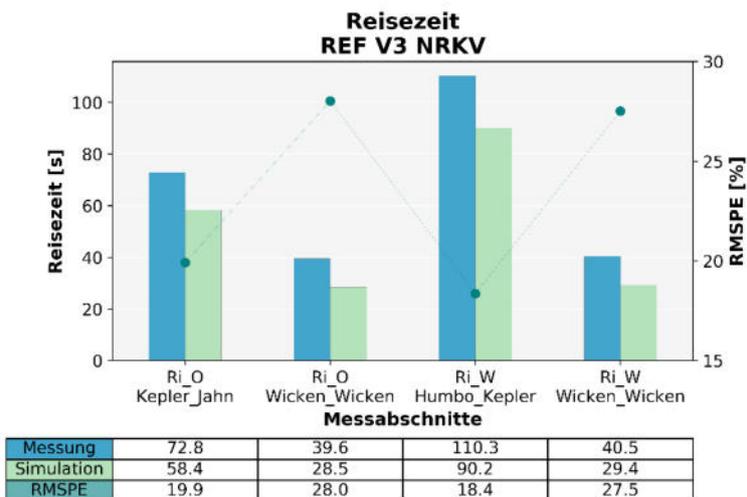


Abbildung 142: REF V3 NRKV (Nicht regelkonformes Verhalten) - Vergleich Messung und Simulation der Reisezeit mit RMSPE-Fehlermaß

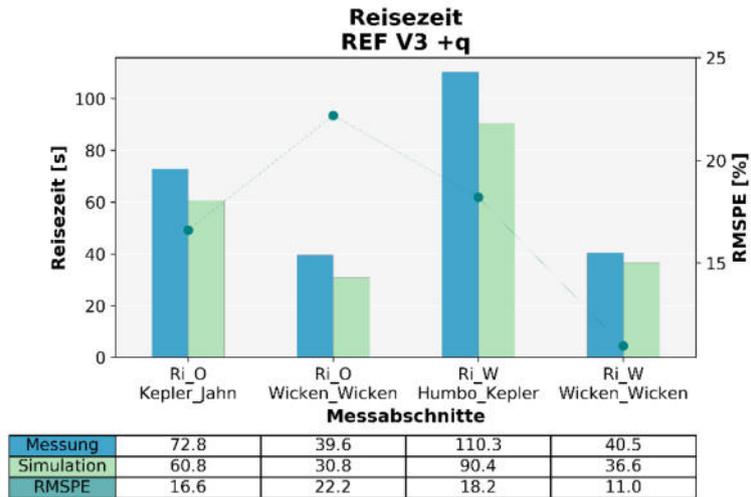


Abbildung 143: REF V3 +q (Zuflusserrhöhung) - Vergleich Messung und Simulation der Reisezeit mit RMSPE-Fehlermaß

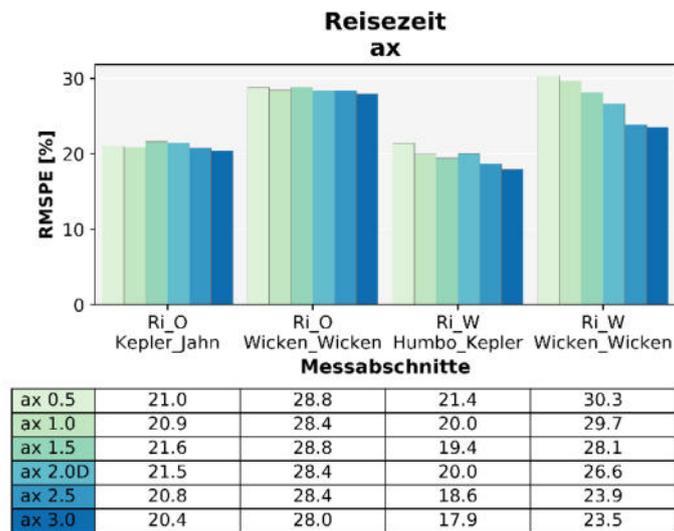


Abbildung 144: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation ax

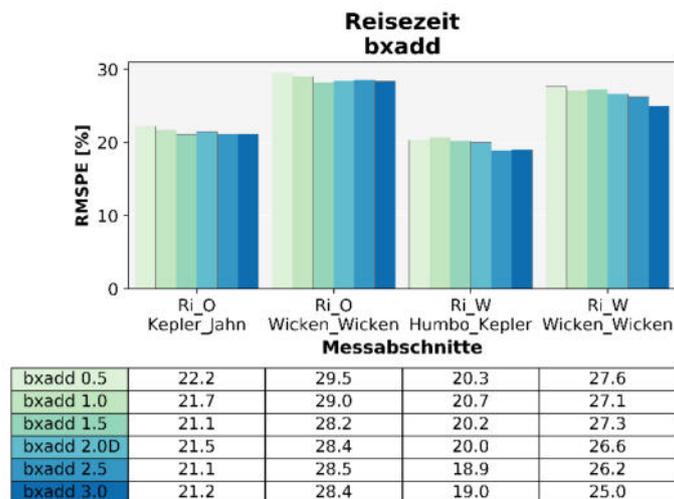


Abbildung 145 REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation bxadd

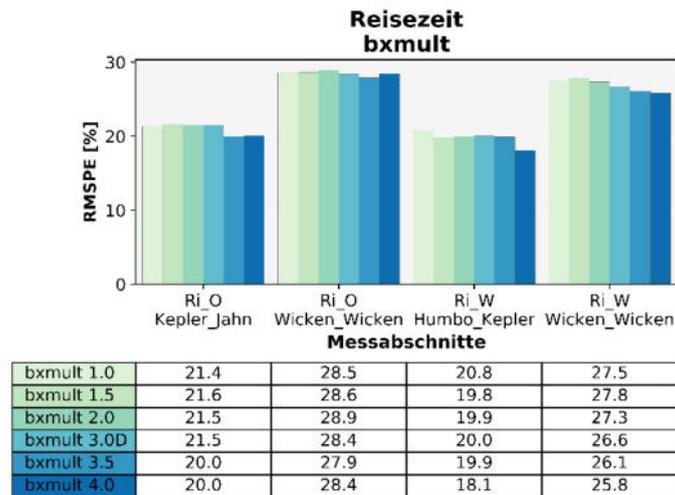


Abbildung 146: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation bxmult

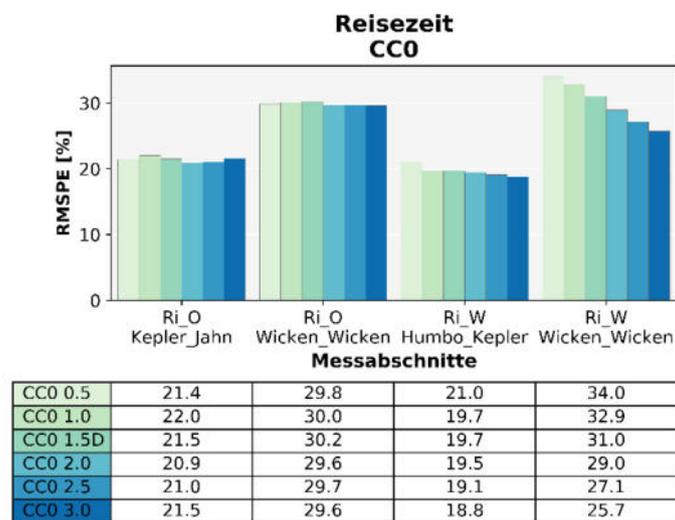


Abbildung 147: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CC0

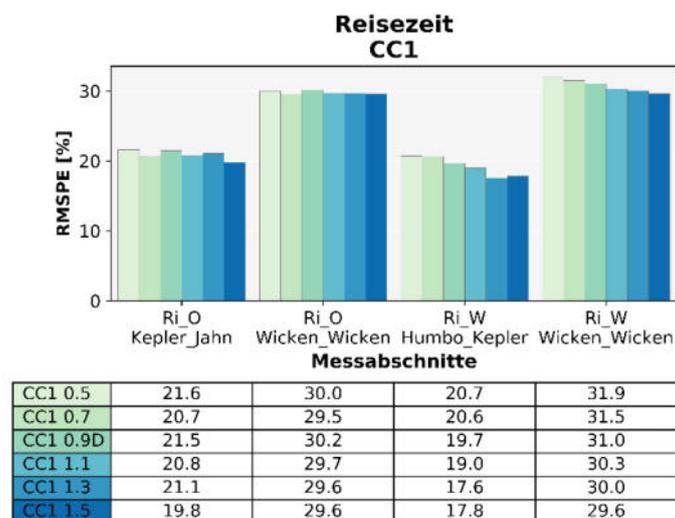


Abbildung 148: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CC1

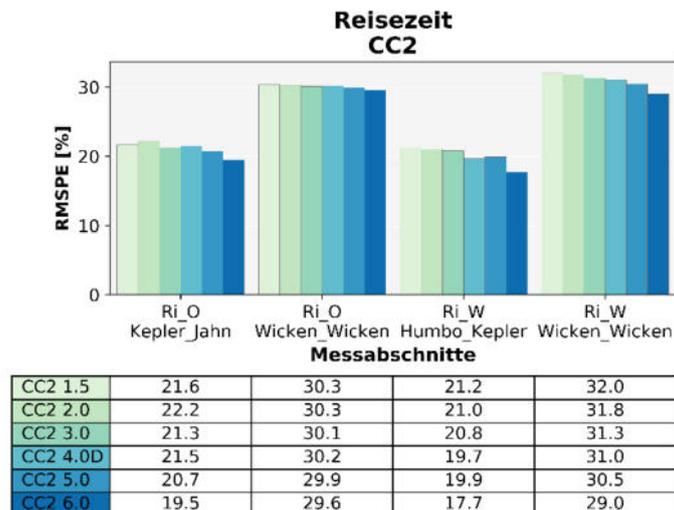


Abbildung 149: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CC2

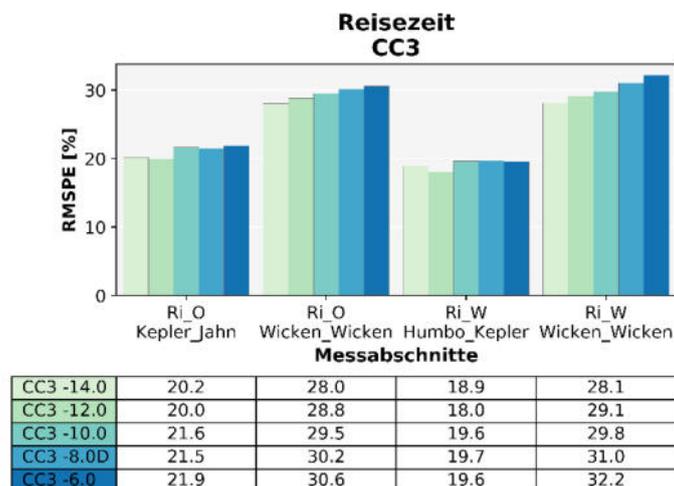


Abbildung 150: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CC3

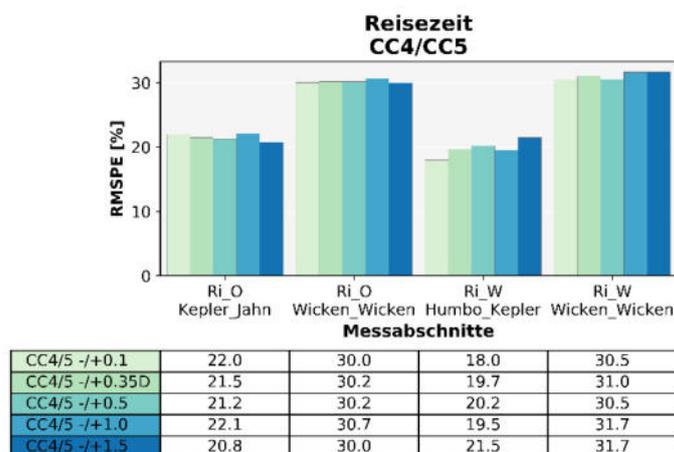


Abbildung 151: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CC4/CC5

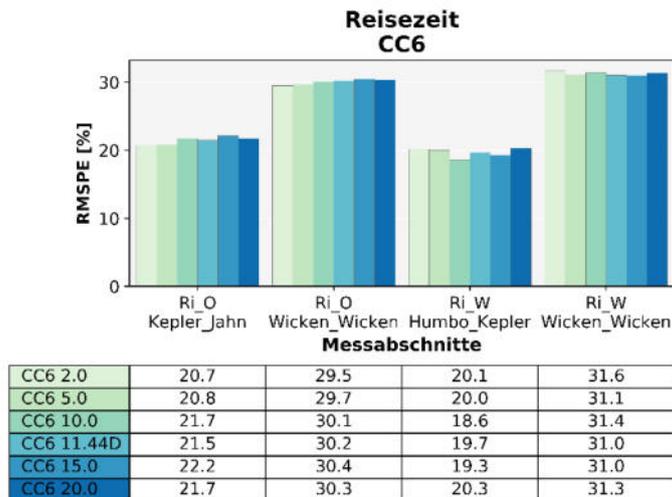


Abbildung 152: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CC6

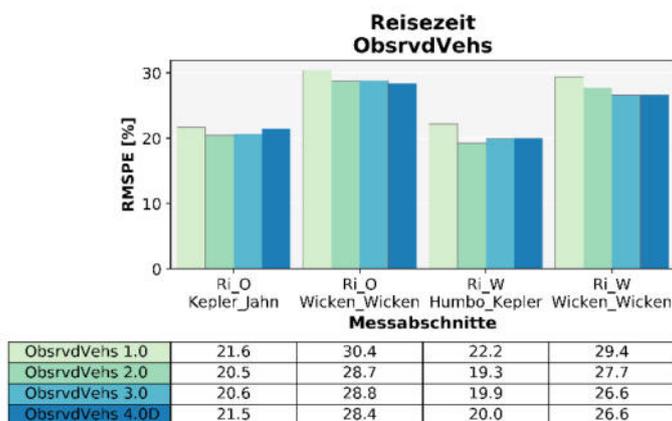


Abbildung 153: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation ObsrvdVehs

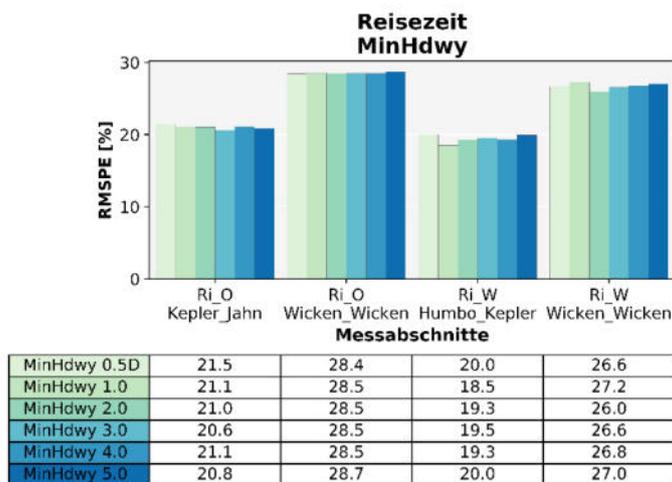


Abbildung 154: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation MinHdwy

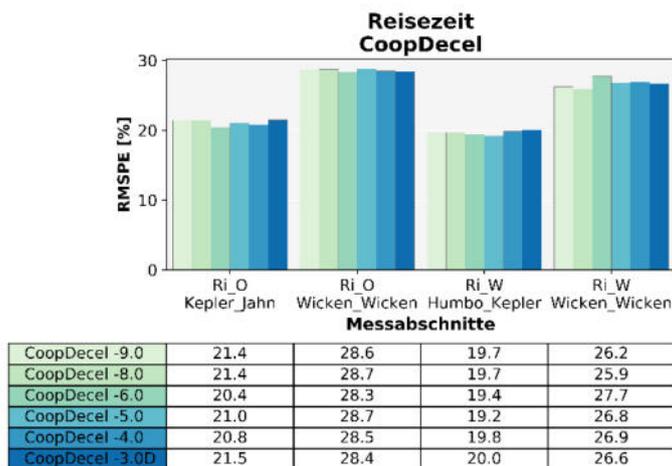


Abbildung 155: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation CoopDecel

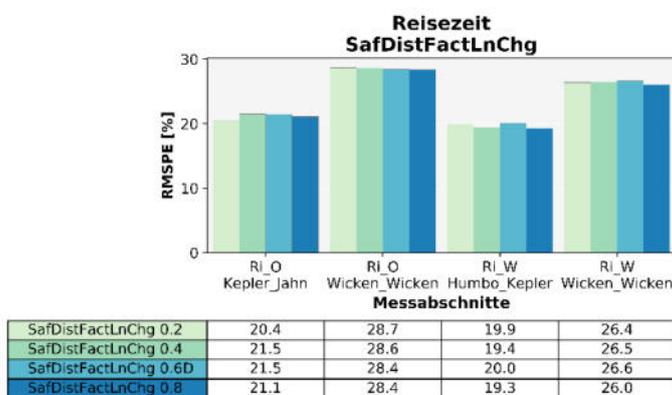


Abbildung 156: REF V2 - Vergleich RMSPE-Fehlermaß mit Parametervariation SafDistFactLnChg

8.1.3 Konfliktanzahl

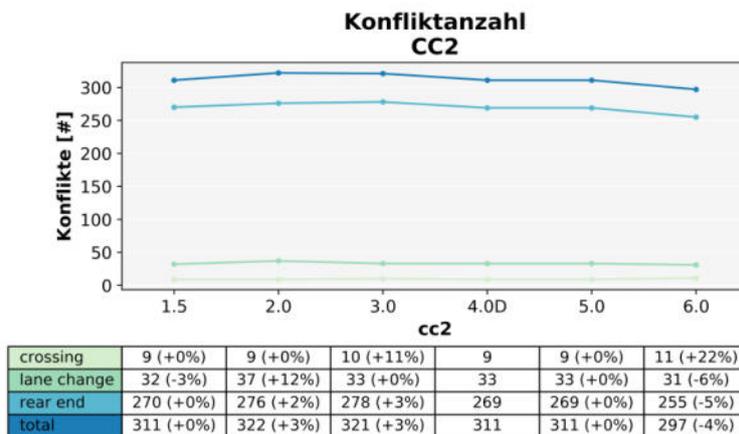


Abbildung 157: REF V2 - Vergleich Konfliktanzahl mit Parametervariation CC2

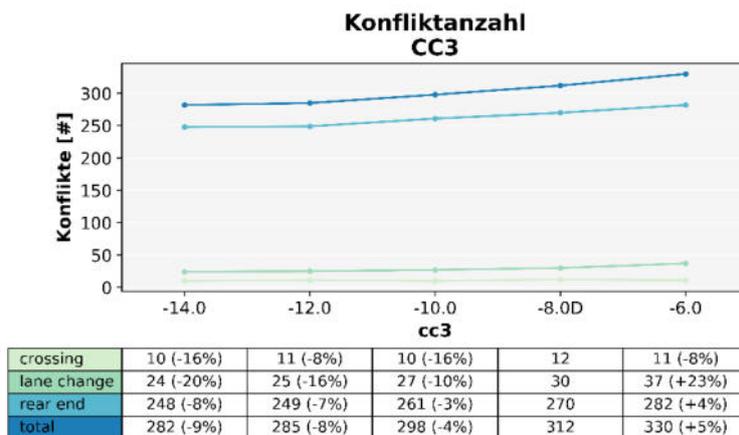


Abbildung 158: REF V2 - Vergleich Konfliktanzahl mit Parametervariation CC3

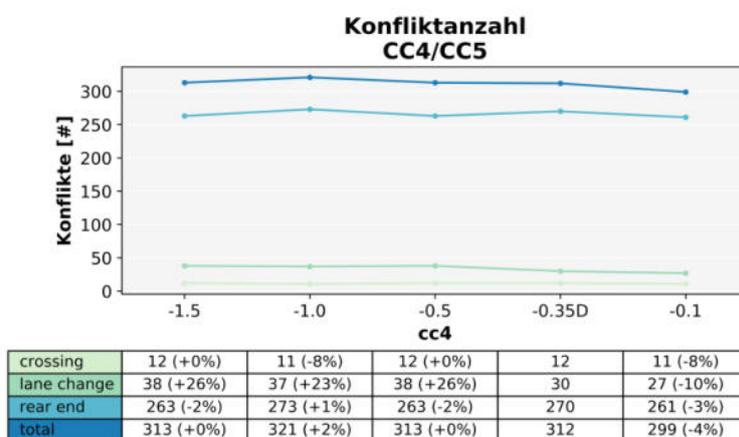


Abbildung 159: REF V2 - Vergleich Konfliktanzahl mit Parametervariation CC4/CC5

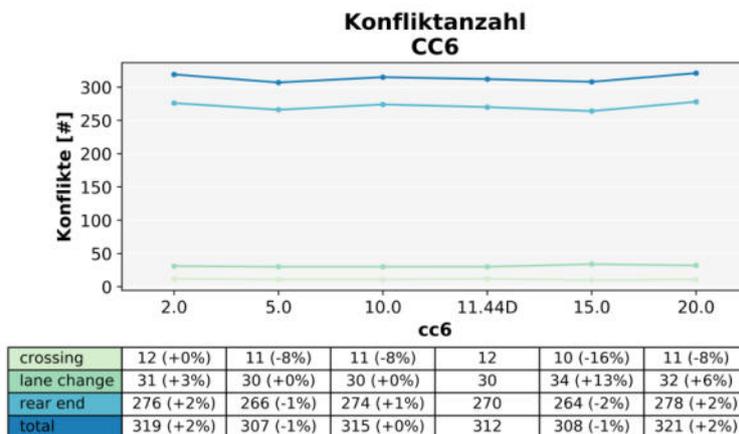


Abbildung 160: REF V2 - Vergleich Konfliktanzahl mit Parametervariation CC6

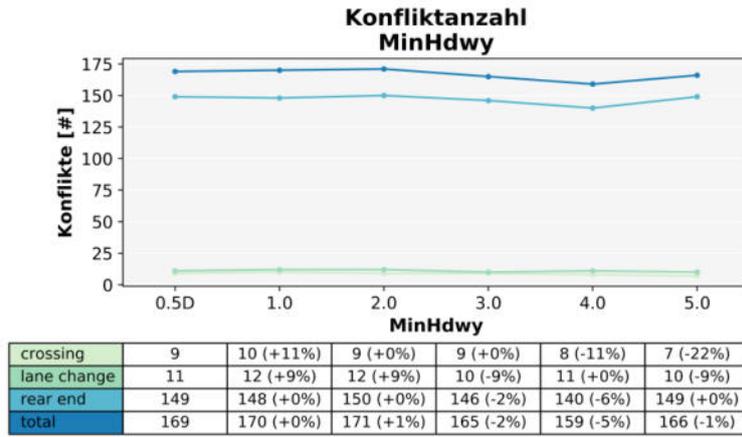


Abbildung 161: REF V2 - Vergleich Konfliktanzahl mit Parametervariation MinHdwy

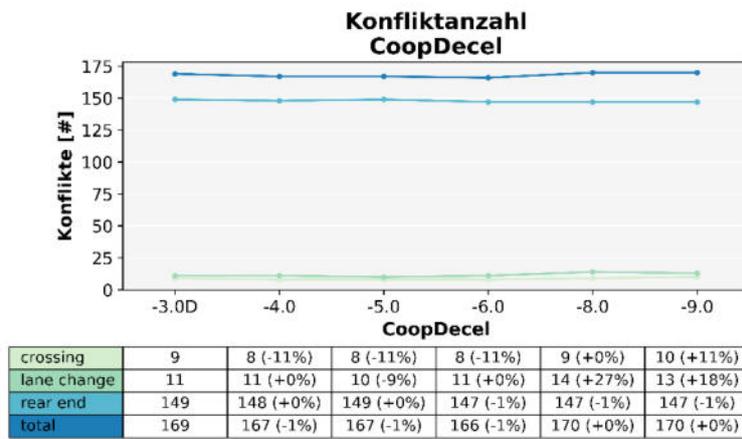


Abbildung 162: REF V2 - Vergleich Konfliktanzahl mit Parametervariation CoopDecel

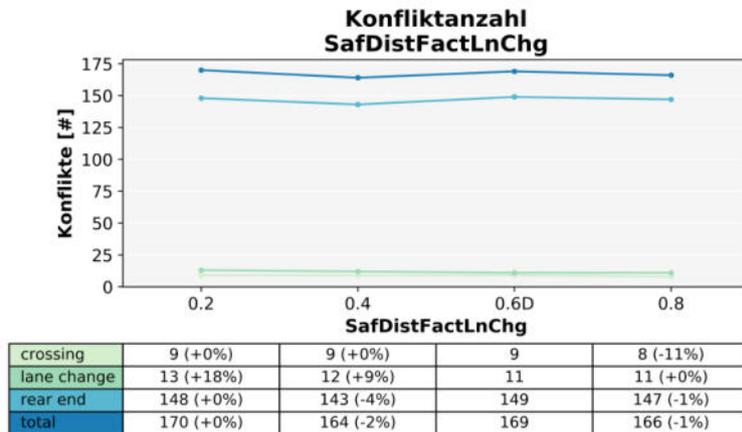
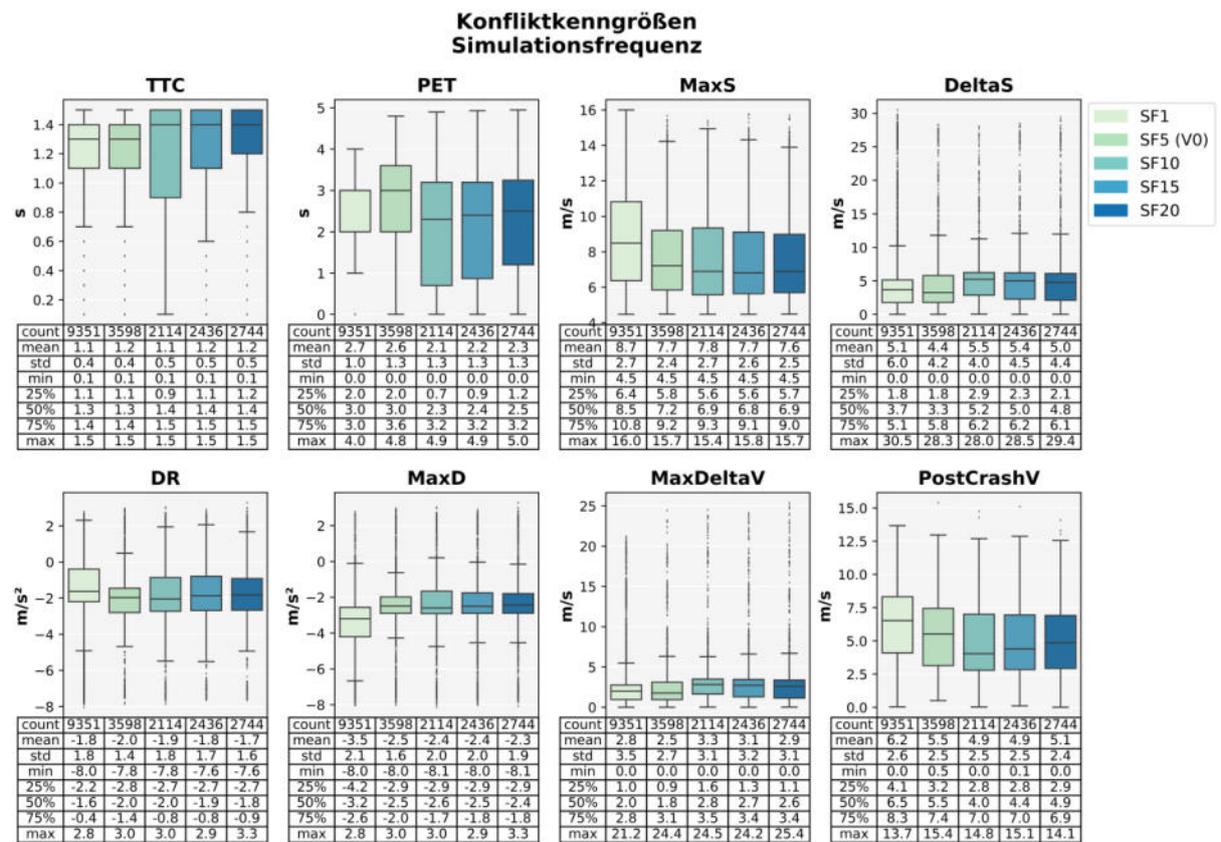
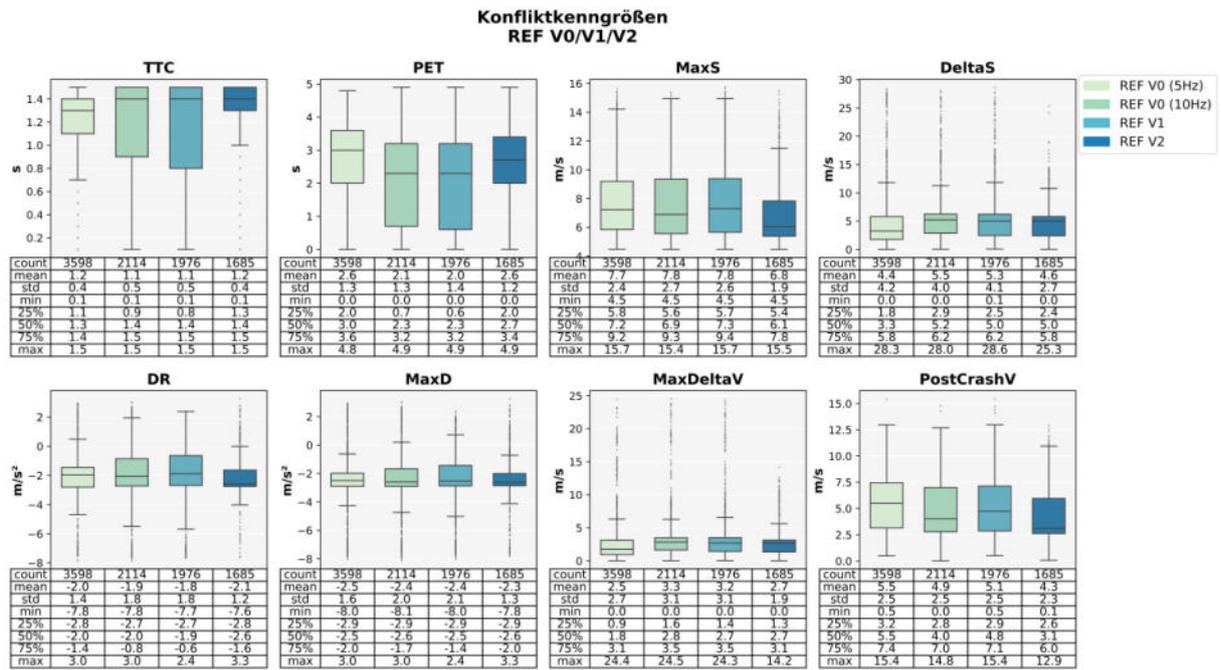


Abbildung 163: REF V2 - Vergleich Konfliktanzahl mit Parametervariation SafDistFactLnChg

8.1.4 Konfliktkenngrößen



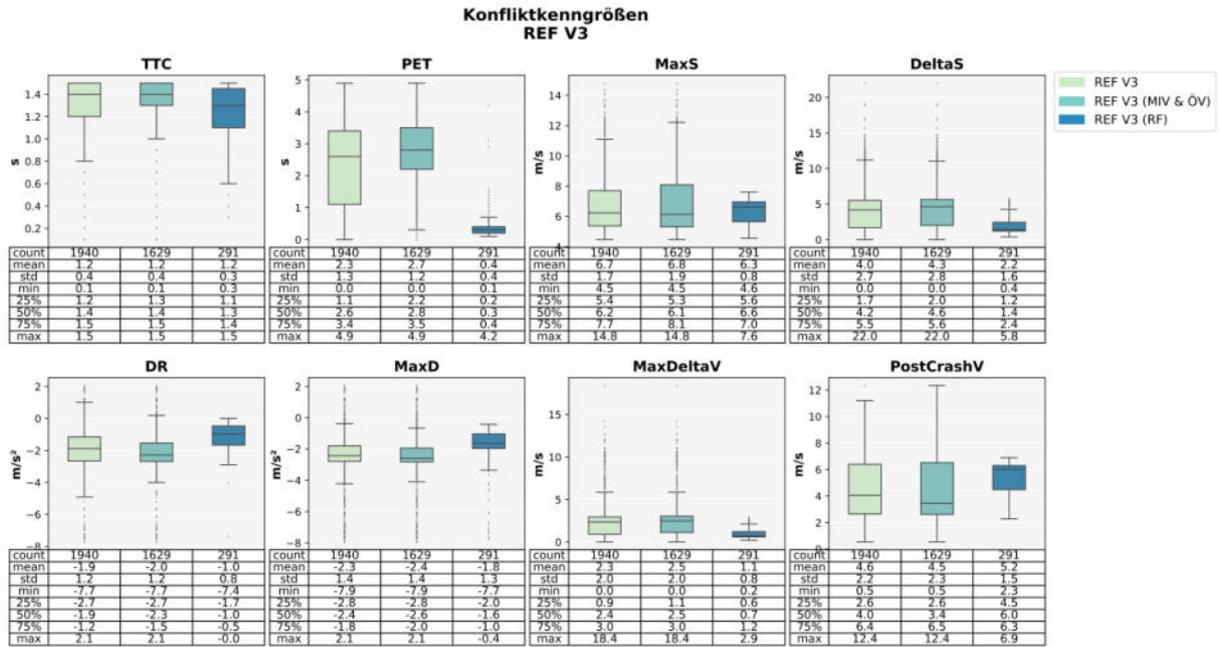


Abbildung 166: REF V3 – Konfliktkenngrößen nach Modus

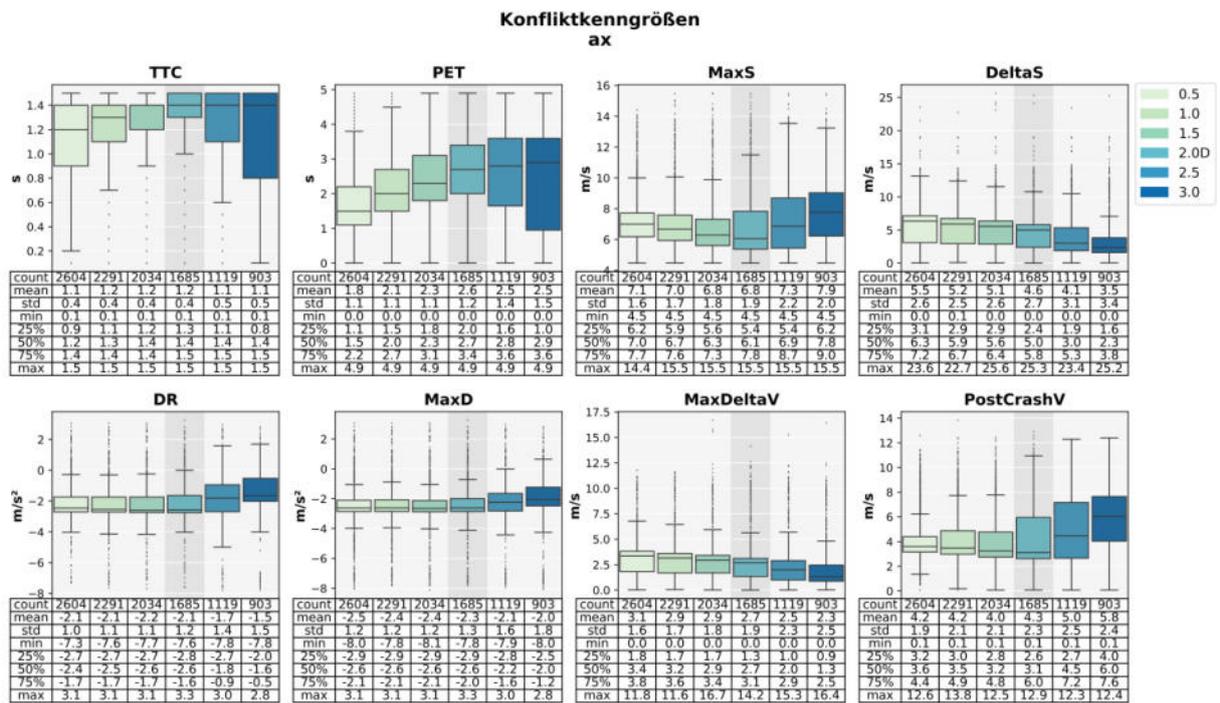


Abbildung 167: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation ax

Konfliktkenngrößen
bxadd

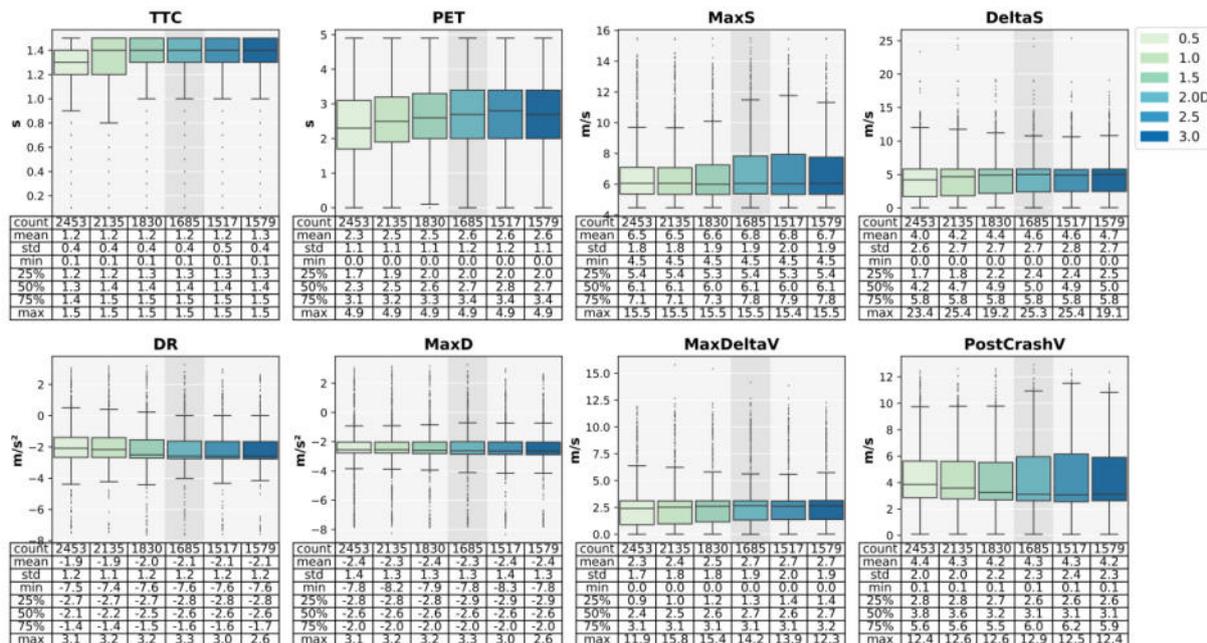


Abbildung 168: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation bxadd

Konfliktkenngrößen
bxmult

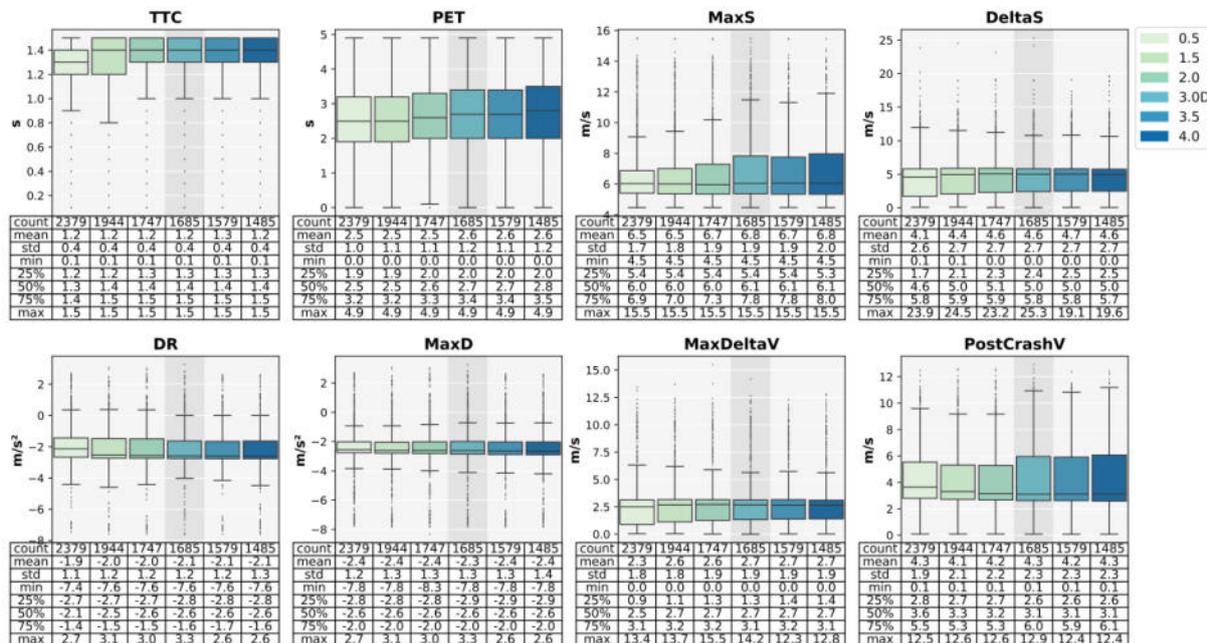


Abbildung 169: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation bxmult

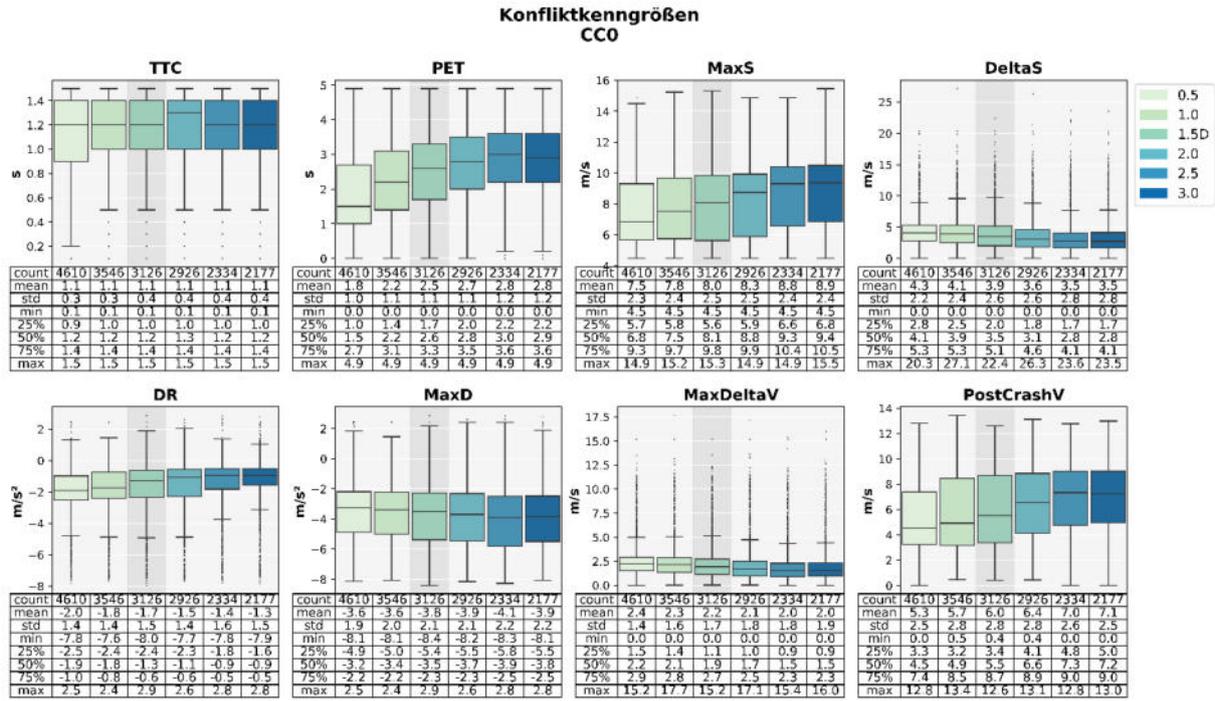


Abbildung 170: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CC0

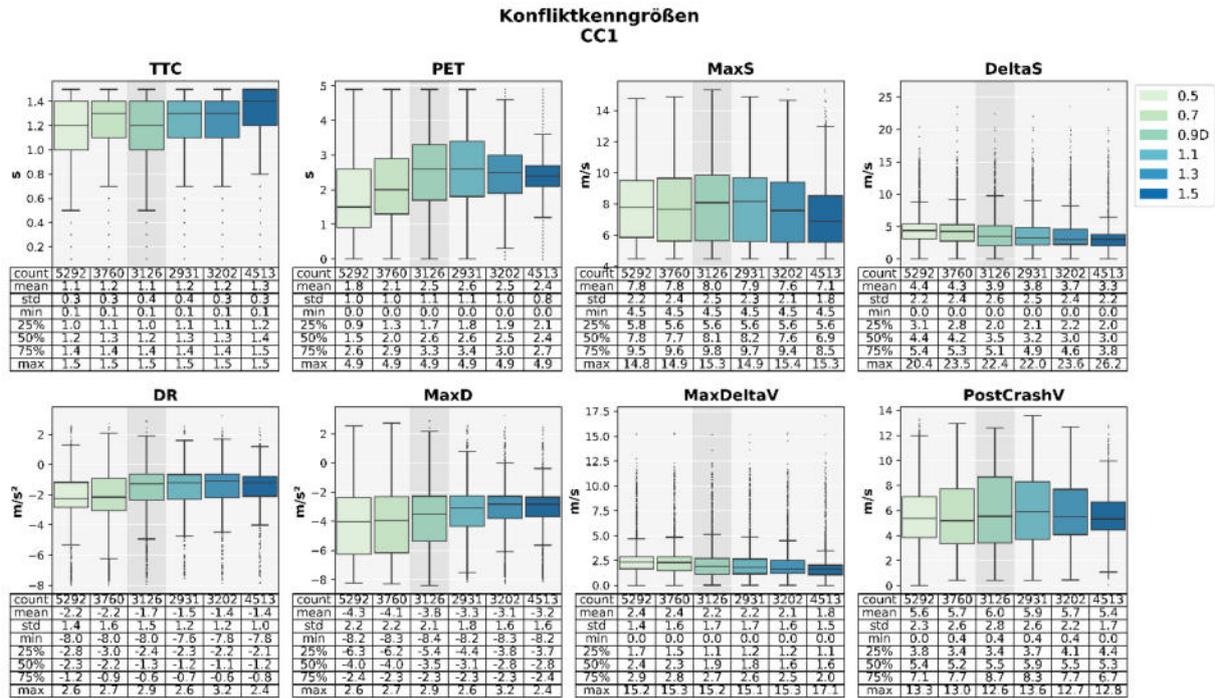


Abbildung 171: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CC1

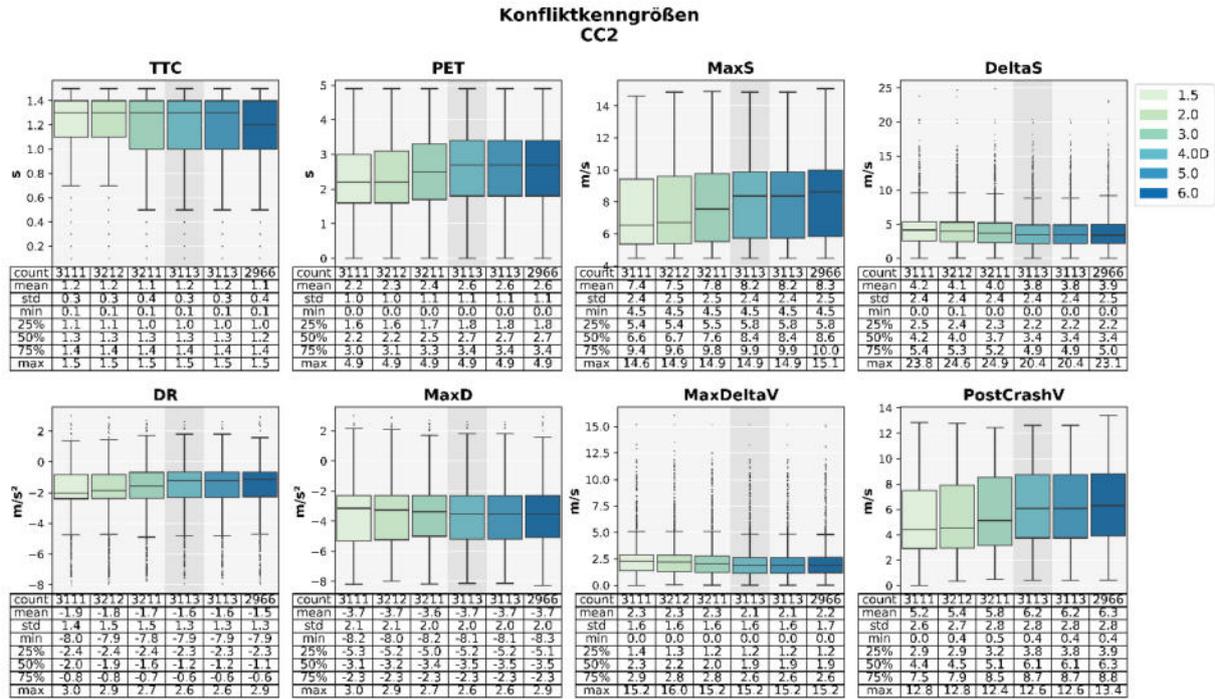


Abbildung 172: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CC2

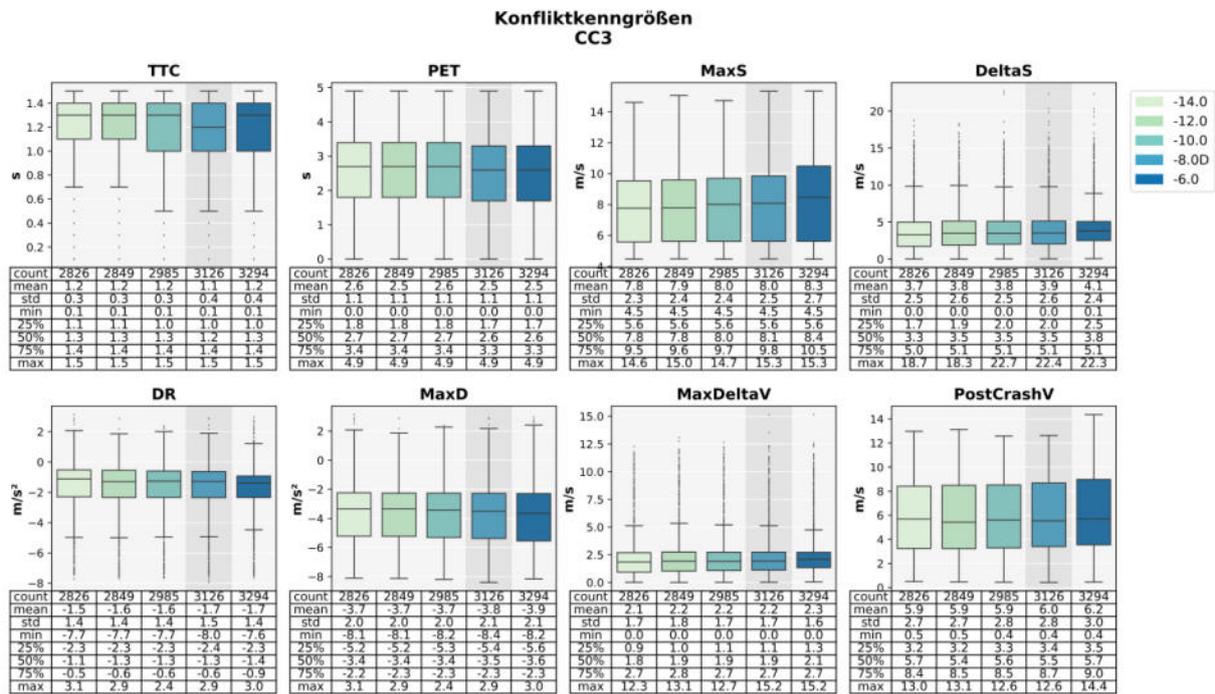


Abbildung 173: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CC3

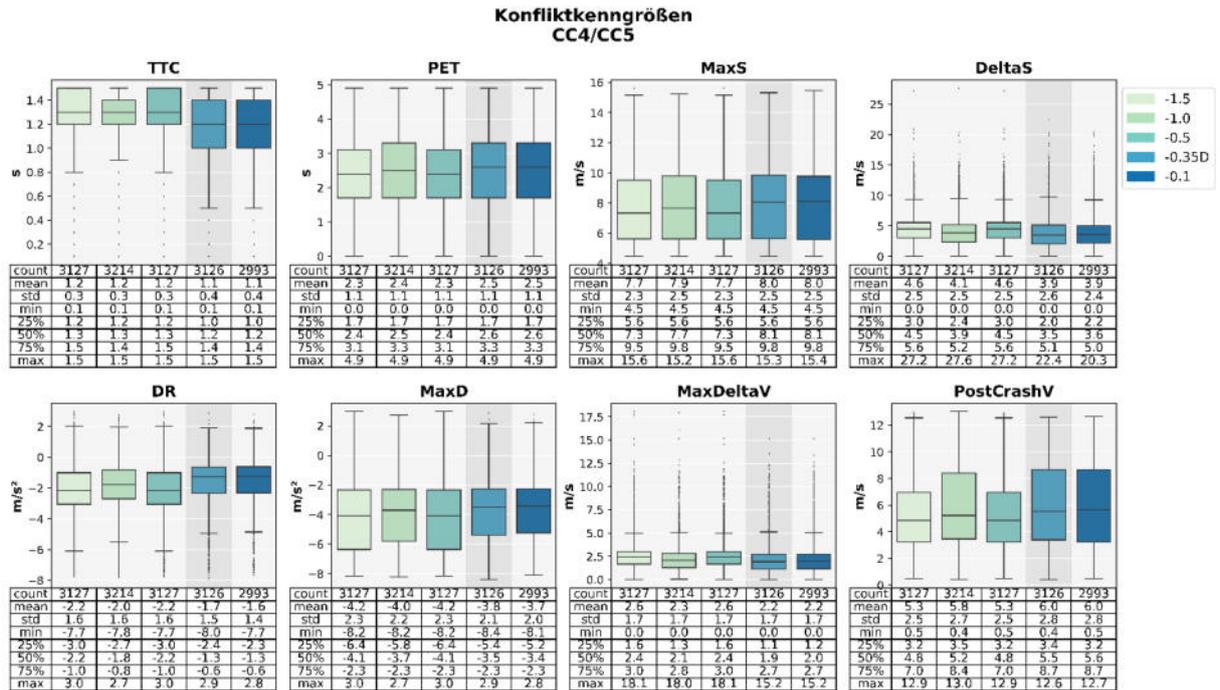


Abbildung 174: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CC4/CC5

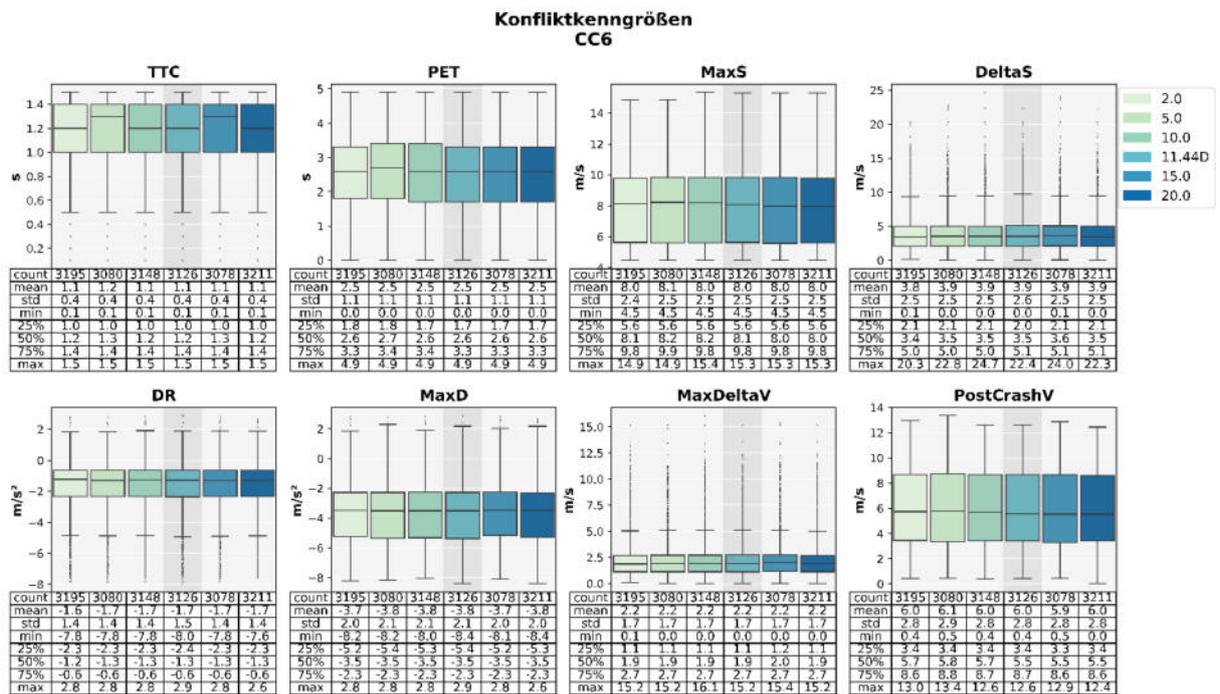


Abbildung 175: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CC6

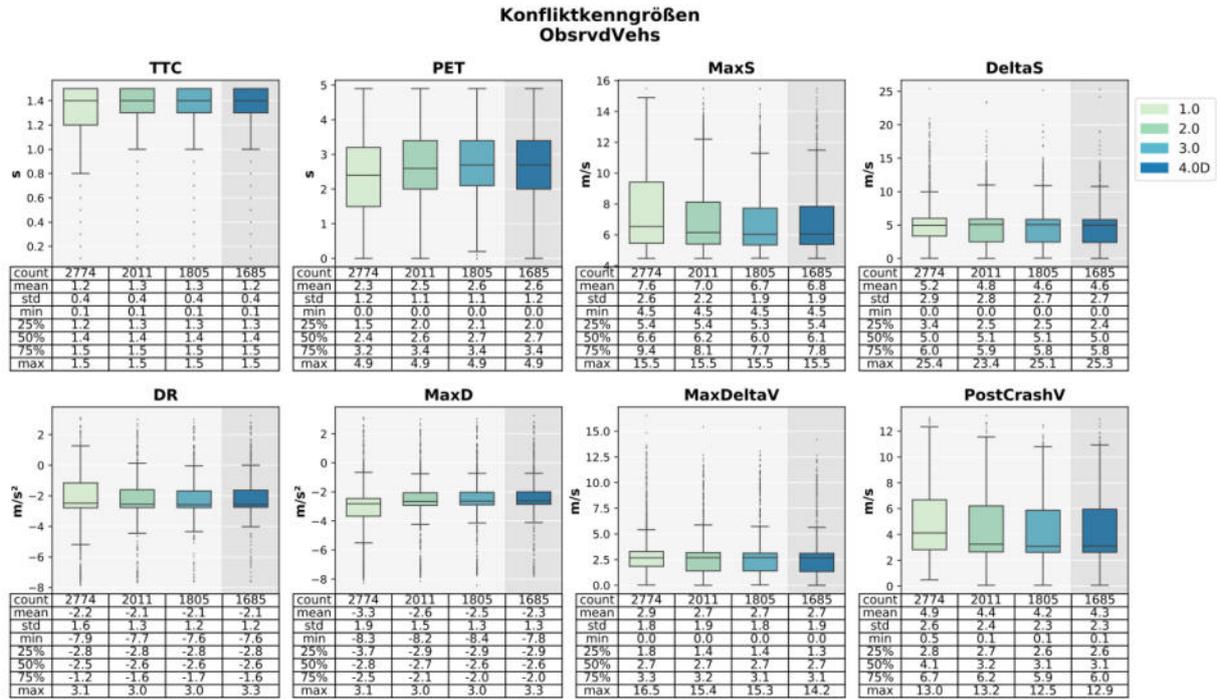


Abbildung 176: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation ObsrvdVehs

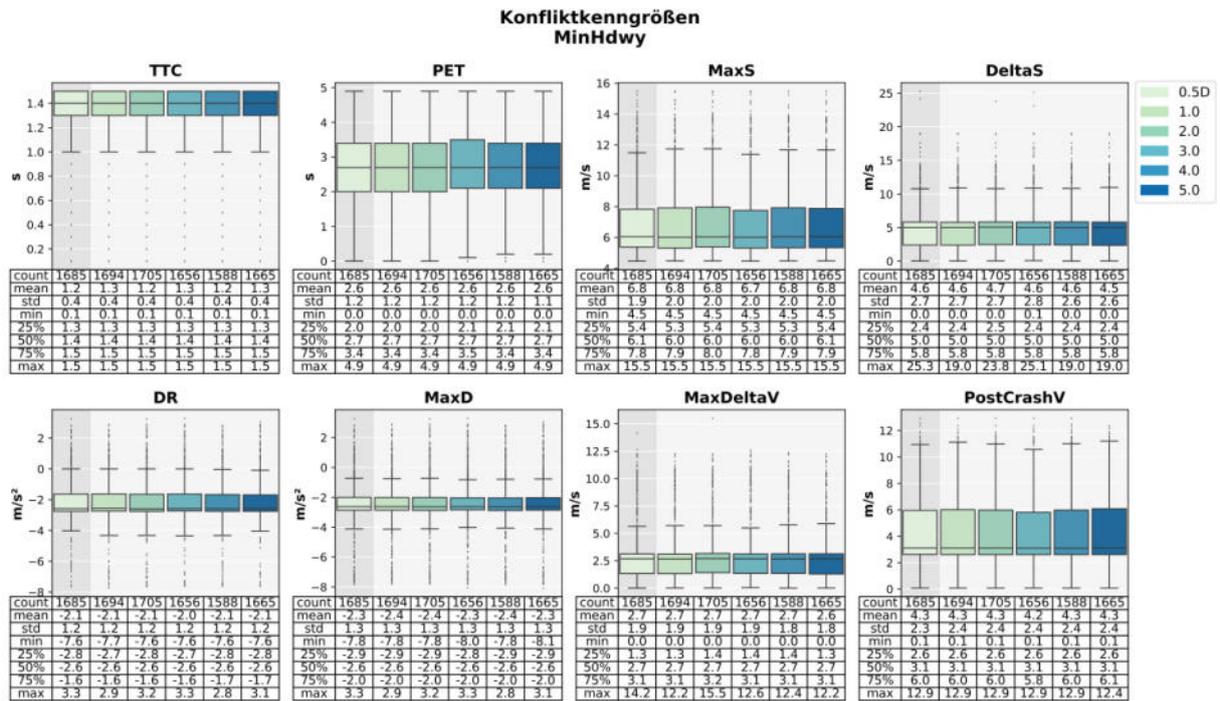


Abbildung 177: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation MinHdwy

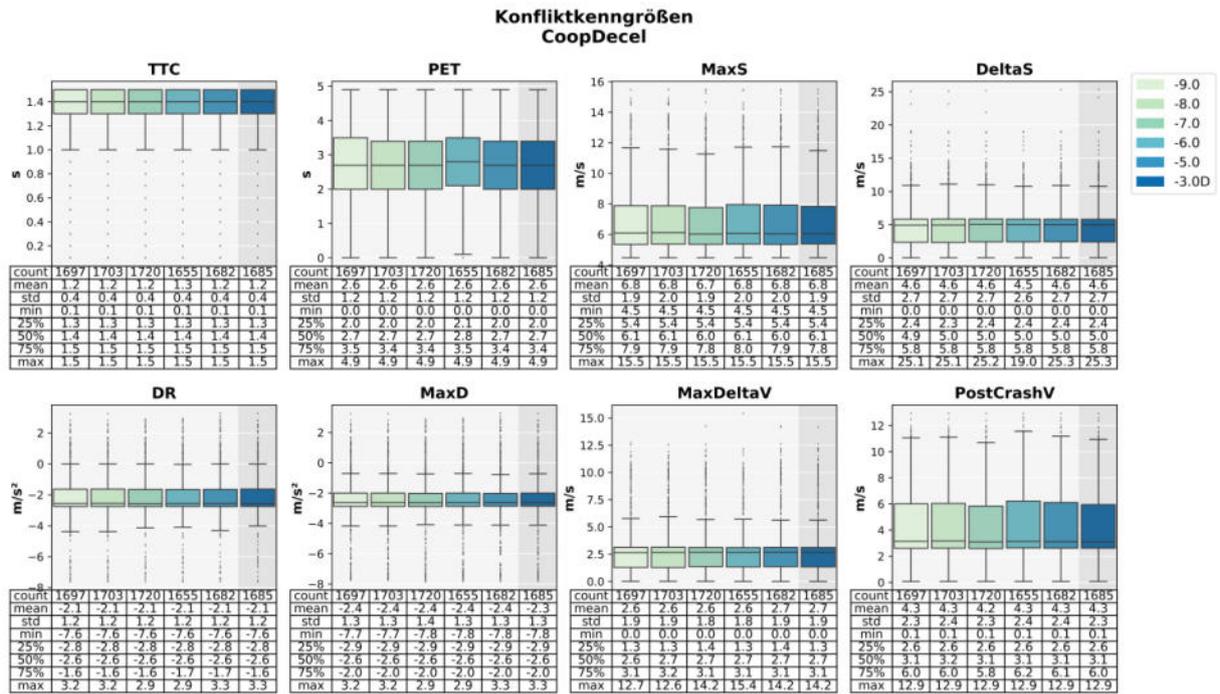


Abbildung 178: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation CoopDecel

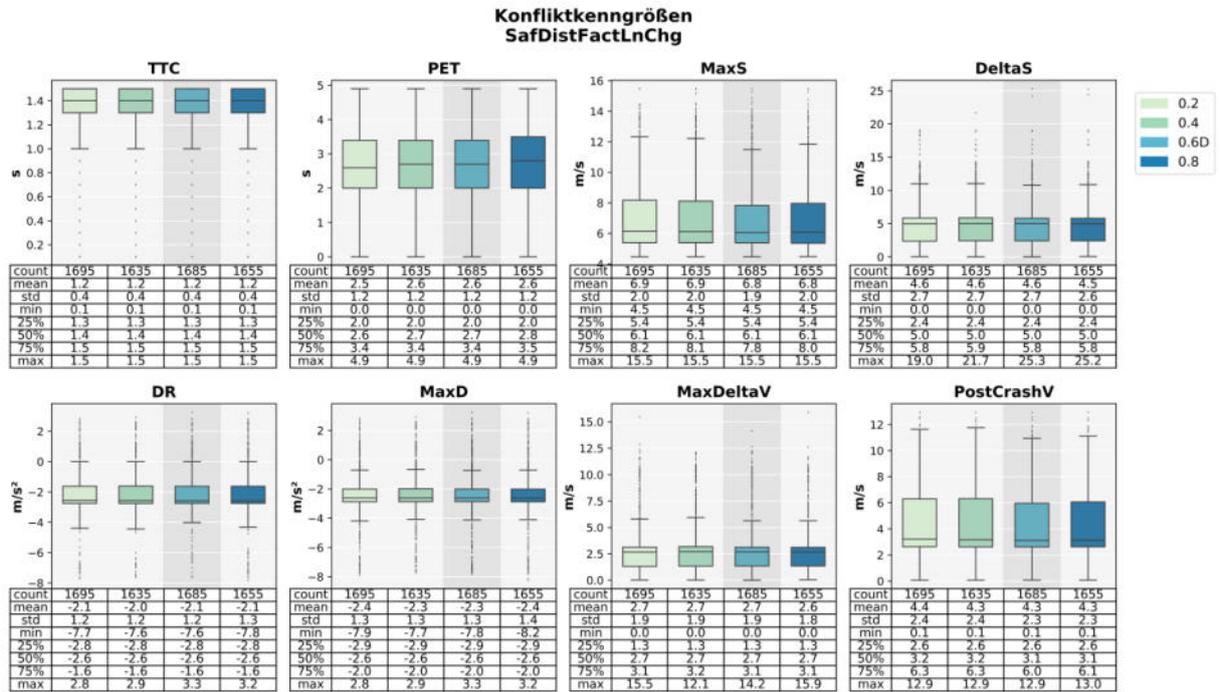


Abbildung 179: REF V2 - Vergleich Konfliktkenngrößen mit Parametervariation SafFactLnChg

8.1.5 Beschleunigungsverläufe

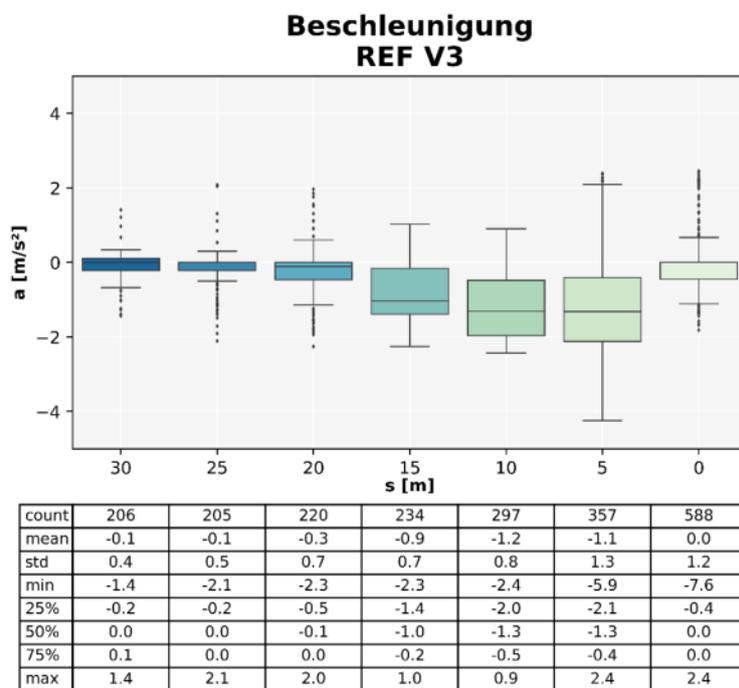


Abbildung 180: Beschleunigungsverlauf der Fahrzeuge auf Strecke 13 ohne gesonderte Parametrierung

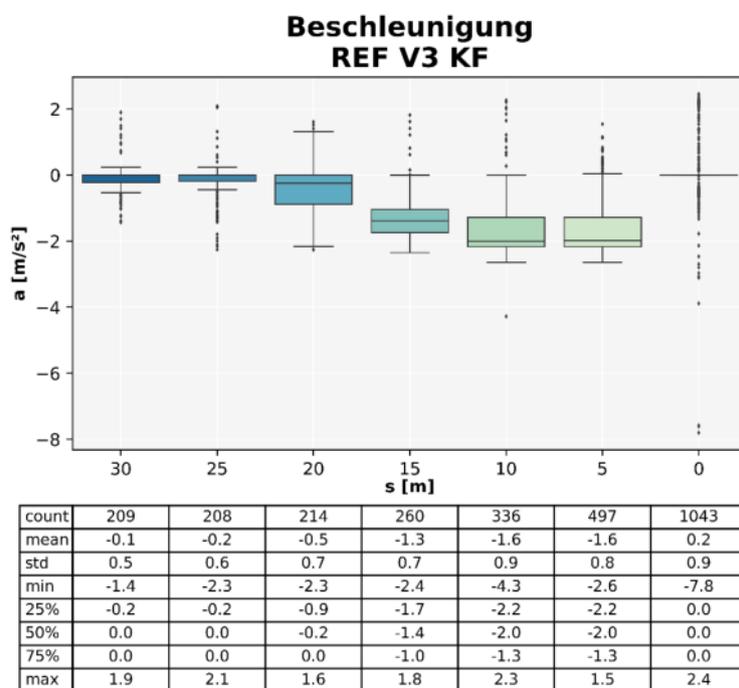


Abbildung 181: Beschleunigungsverlauf der Fahrzeuge auf Strecke 13 mit Parametrierung der Konfliktflächen

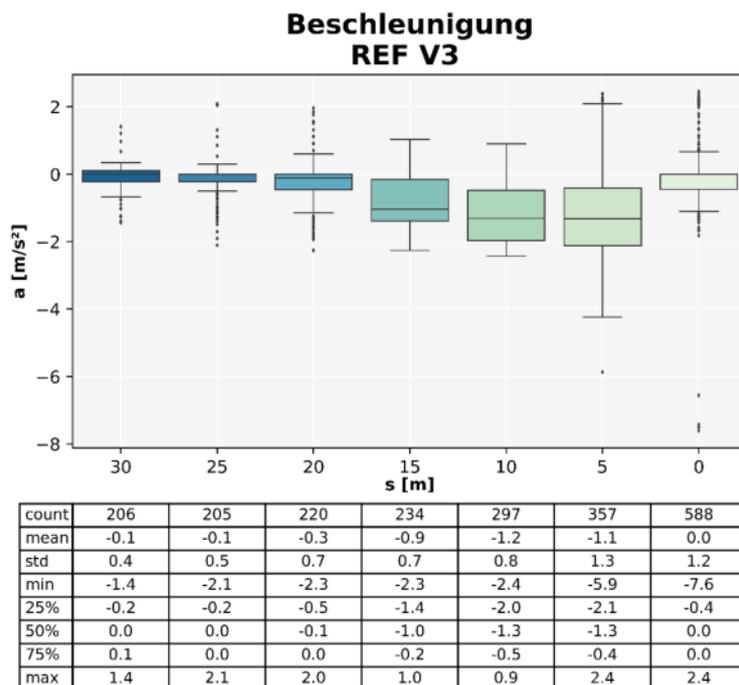


Abbildung 182: Beschleunigungsverlauf der Fahrzeuge auf Strecke 13 mit Parametrierung der Langsamfahrbereiche

8.2 Routenentscheidungen

8.2.1 Motorisierter Verkehr

Tabelle 27: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 1 in den Szenarien REF V0 und REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahr- zeugrouten (Nr)	Ende Strecke Name (Nr)	REF V0	REF V3
Körösisstraße (46)	1-1	Bezirksanbindung (111)	20 (12%)	17 (10%)
	1-2	Keplerbrücke (12)	91 (56%)	71 (44%)
	1-3	Glacisstraße / B67a (6)	51 (31%)	44 (27%)
	1-4	Neubaugasse (141)		1 (1%)
	1-5	Lendplatz (162)		10 (6%)
	1-6	Lendplatz (163)		19 (12%)
		Summe		162 (100%)

Tabelle 28: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 2 in den Szenarien REF V0 und REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahr- zeugrouten (Nr)	Ende Strecke Name (Nr)	REF V0	REF V3
Kaiser-Franz-Josef-Kai (21)	2-4	Körösistraße (46)	147 (15%)	147 (15%)
	2-5	Keplerbrücke (12)	561 (56%)	387 (39%)
	2-6	Heinrichstraße / B72 (60)	83 (8%)	83 (8%)
	2-7	Bezirksanbindung (111)	4 (0%)	4 (0%)
	2-8	Laimburggasse (14)	14 (1%)	14 (1%)
	2-9	Glacisstraße / B67a (6)	187 (19%)	187 (19%)
	2-10	Humboldtstraße (22)	4 (0%)	4 (0%)
	2-11	Neubaugasse (141)		6 (1%)
	2-12	Lendplatz (162)		112 (11%)
	2-13	Lendplatz (163)		56 (6%)
		Summe		1000 (100%)

Tabelle 29: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 3 in den Szenarien REF V0 und REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahr- zeugrouten (Nr)	Ende Strecke Name (Nr)	REF V0	REF V3
Keplerbrücke (11) Keplerstraße (144)	3-11	Körösistraße (46)	175 (41%)	112 (34%)
	3-12	Bezirksanbindung (111)	19 (4%)	13 (4%)
	3-13	Heinrichstraße / B72 (60)	54 (13%)	30 (9%)
	3-14	Bezirksanbindung (111)	2 (0%)	2 (1%)
	3-15	Laimburggasse (14)	38 (9%)	26 (8%)
	3-16	Glacisstraße / B67a (6)	140 (32%)	88 (27%)
	3-17	Humboldtstraße (22)	3 (1%)	2 (1%)
	3-18	Neubaugasse (143)		30 (9%)
	3-19	Lendplatz (162)		20 (6%)
	3-20	Lendplatz (163)		5 (2%)
		Summe		431 (100%)

Tabelle 30: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 4 in den Szenarien REF V0 und REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahr- zeugrouten (Nr)	Ende Strecke Name (Nr)	REF V0	REF V3
Heinrichstraße / B73 (59)	4-18	Körösstraße (46)	17 (6%)	17 (6%)
	4-19	Keplerbrücke (12)	35 (12%)	24 (8%)
	4-20	Bezirksanbindung (111)	53 (18%)	53 (18%)
	4-21	Laimburggasse (14)	16 (5%)	16 (5%)
	4-22	Glacisstraße / B67a (6)	74 (25%)	74 (25%)
	4-23	Bergmannngasse / B67a (28)	106 (35%)	106 (35%)
	4-25	Lendplatz (163)		4 (1%)
	4-26	Lendplatz (162)		7 (2%)
		Summe		301 (100%)

Tabelle 31: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 5 in den Szenarien REF V0 und REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahr- zeugrouten (Nr)	Ende Strecke Name (Nr)	REF V0	REF V3
Bezirksanbindung (112)	5-24	Keplerbrücke (12)	5 (11%)	3 (6%)
	5-25	Heinrichstraße / B72 (60)	2 (4%)	2 (4%)
	5-26	Glacisstraße / B67a (6)	35 (74%)	35 (74%)
	5-27	Humboldtstraße (22)	3 (6%)	3 (6%)
	5-28	Bergmannngasse / B67a (28)	2 (4%)	2 (4%)
	5-29	Lendplatz (162)		1 (2%)
	5-30	Lendplatz (163)		1 (2%)
		Summe		47 (100%)

Tabelle 32: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 6 in den Szenarien REF V0 und REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahr- zeugrouten (Nr)	Ende Strecke Name (Nr)	REF V0	REF V3
Grabenstraße / B67a (9)	6-29	Keplerbrücke (12)	166 (17%)	101 (10%)
	6-30	Heinrichstraße / B72 (60)	161 (16%)	165 (17%)
	6-31	Bezirksanbindung (111)	11 (1%)	11 (1%)
	6-32	Glacisstraße / B67a (6)	640 (65%)	657 (67%)
	6-33	Neubaugasse (141)		2 (0%)
	6-34	Lendplatz (162)		28 (3%)
	6-35	Lendplatz (163)		14 (1%)
		Summe		978 (100%)

Tabelle 33: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 7 in den Szenarien REF V0 und REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahr- zeugrouten (Nr)	Ende Strecke Name (Nr)	REF V0	REF V3
Laimburggasse (13)	7-33	Keplerbrücke (12)	35 (44%)	24 (30%)
	7-34	Heinrichstraße / B72 (60)	12 (15%)	12 (15%)
	7-35	Glacisstraße / B67a (6)	32 (41%)	32 (41%)
	7-36	Lendplatz (162)		7 (9%)
	7-37	Lendplatz (163)		4 (5%)
		Summe		79 (100%)

Tabelle 34: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 8 in den Szenarien REF V0 und REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahr- zeugrouten (Nr)	Ende Strecke Name (Nr)	REF V0	REF V3
Glacisstraße / B67a (7)	8-36	Körösstraße (46)	41 (4%)	61 (6%)
	8-37	Keplerbrücke (12)	84 (8%)	45 (4%)
	8-38	Heinrichstraße / B72 (60)	36 (3%)	36 (3%)
	8-39	Laimburggasse (14)	84 (8%)	85 (8%)
	8-40	Humboldtstraße (22)	11 (1%)	11 (1%)
	8-41	Bergmannngasse / B67a (28)	782 (75%)	782 (75%)
	8-42	10068	1 (0%)	0 (0%)
	8-43	Neubaugasse (141)		1 (0%)
	8-44	Lendplatz (163)		6 (1%)
	8-45	Lendplatz (162)		12 (1%)
		Summe		1039 (100%)

Tabelle 35: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 9 in den Szenarien REF V0 und REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahr- zeugrouten (Nr)	Ende Strecke Name (Nr)	REF V0	REF V3
Humboldtstraße (23)	9-42	Körösstraße (46)	14 (10%)	14 (10%)
	9-43	Keplerbrücke (12)	30 (21%)	21 (14%)
	9-44	Glacisstraße / B67a (6)	48 (33%)	48 (33%)
	9-45	Bergmannngasse / B67a (28)	53 (37%)	53 (37%)
	9-46	Lendplatz (162)		6 (4%)
	9-47	Lendplatz (163)		3 (2%)
		Summe		145 (100%)

Tabelle 36: Relative Belastung der Routenentscheidung 24 im Szenario REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahrzeug- routen (Nr)	Ende Strecke Name (Nr)	REF V3
Lendplatz_S (160)	24-11	Körösstraße (46)	49 (40%)
	24-12	Bezirksanbindung (111)	6 (5%)
	24-13	Heinrichstraße / B72 (60)	13 (11%)
	24-14	Bezirksanbindung (111)	1 (1%)
	24-15	Laimburggasse (14)	11 (9%)
	24-16	Glacisstraße / B67a (6)	38 (31%)
	24-17	Humboldtstraße (22)	1 (1%)
	24-18	Neubaugasse (143)	2 (2%)
		Summe	121 (100%)

Tabelle 37: Relative Belastung der Routenentscheidung 25 im Szenario REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahrzeug- routen (Nr)	Ende Strecke Name (Nr)	REF V3
Lendplatz_N (161)	25-11	Körösstraße (46)	12 (29%)
	25-12	Bezirksanbindung (111)	2 (5%)
	25-13	Heinrichstraße / B72 (60)	3 (7%)
	25-14	Bezirksanbindung (111)	1 (2%)
	25-15	Laimburggasse (14)	2 (5%)
	25-16	Glacisstraße / B67a (6)	10 (24%)
	25-17	Humboldtstraße (22)	1 (2%)
	25-18	Neubaugasse (143)	10 (24%)
		Summe	41 (100%)

8.2.2 Fahrradverkehr

Tabelle 38: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 14 für den Fahrradverkehr in den Szenarien REF V0 und REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahr- zeugrouten Nr	Ende Strecke Name (Nr)	REF V3	REF V3 RF
Radverkehr W_O (154)	14-1	Keplerbrücke (168)	175 (97%)	135 (90%)
	14-2	Neubaugasse (143)	3 (2%)	5 (3%)
	14-3	Neubaugasse RF (158)	2 (1%)	10 (7%)
		Summe	180 (100%)	150 (100%)

Anhang

Tabelle 39: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 15 für den Fahrradverkehr in den Szenarien REF V0 und REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahr- zeugrouten Nr	Ende Strecke Name (Nr)	REF V3	REF V3 RF
Radverkehr O_W (153)	15-1	Keplerstraße (150)	115 (96%)	105 (88%)
	15-2	Neubaugasse (143)	3 (3%)	5 (4%)
	15-3	Neubaugasse RF (158)	2 (2%)	10 (8%)
		Summe	120 (100%)	120 (100%)

Tabelle 40: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 16 für den Fahrradverkehr in den Szenarien REF V0 und REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahr- zeugrouten Nr	Ende Strecke Name (Nr)	REF V3	REF V3 RF
Radverkehr N_S (159)	16-1	Keplerstraße (150)	2 (40%)	30 (38%)
	16-2	Keplerbrücke (168)	2 (40%)	45 (56%)
	16-3	Neubaugasse (143)	1 (20%)	5 (6%)
		Summe	5 (100%)	80 (100%)

Tabelle 41: Vergleich Relative Belastungen der Routenentscheidung 17 für den Fahrradverkehr in den Szenarien REF V0 und REF V3

Beginn Strecke Name (Nr)	Statische Fahr- zeugrouten Nr	Ende Strecke Name (Nr)	REF V3	REF V3 RF
Radverkehr S_N (157)	17-1	Keplerstraße (150)	2 (40%)	2 (40%)
	17-2	Keplerbrücke (168)	2 (40%)	2 (40%)
	17-3	Neubaugasse RF (158)	1 (20%)	1 (20%)
		Summe	5 (100%)	5 (100%)

8.3 ÖPNV

Tabelle 42: ÖV-Linien im Verkehrsmodell REF V0

ÖPNV - Linien		
Nr	Name	FzTyp
41	4Murpark	1300: Strassenbahn
42	4Andritz	1300: Strassenbahn
51	5Puntigam	1300: Strassenbahn
52	5Andritz	1300: Strassenbahn
391	39Wirtschaftskammer	300: Bus
392	39Urnenfriedhof	300: Bus
411	41St. Leonhard/LKH	310: Gelenkbus
412	41Dürrgrabenweg	310: Gelenkbus
581	58Mariagrün	300: Bus
582	58Hauptbahnhof	300: Bus
631	63St.Peter	310: Gelenkbus
632	63Hauptbahnhof	310: Gelenkbus

Tabelle 43: ÖV-Haltestellen im Verkehrsmodell REF V0 (Linien 4,5,39,41)

ÖPNV - Haltestellen			
Nr	Name	Nr Haltestelle	Name Haltestelle
41	4Murpark	8	Lange Gasse 4 Murpark
41	4Murpark	10	Keplerbrücke
41	4Murpark	4	Schloßbergbahn 4 Murpark
42	4Andritz	1	Schloßbergbahn 4 Andritz
42	4Andritz	9	Keplerbrücke
42	4Andritz	5	Lange Gasse 4 Andritz
51	5Puntigam	7	Lange Gasse 5 Puntigam
51	5Puntigam	10	Keplerbrücke
51	5Puntigam	3	Schloßbergbahn 5 Puntigam
52	5Andritz	2	Schloßbergbahn 5 Andritz
52	5Andritz	9	Keplerbrücke
52	5Andritz	6	Lange Gasse 5 Andritz
391	39Wirtschaftskammer	12	Zinzendorfgasse
391	39Wirtschaftskammer	13	Geidorfplatz
391	39Wirtschaftskammer	14	Wormgasse
391	39Wirtschaftskammer	11	Goethestraße
392	39Urnenfriedhof	17	Franckstraße/Margaretenbad
392	39Urnenfriedhof	16	Wormgasse
392	39Urnenfriedhof	18	Geidorfplatz
392	39Urnenfriedhof	15	Zinzendorfgasse
411	41St. Leonhard/LKH	20	Grabenkirche
411	41St. Leonhard/LKH	19	Grabenstraße
411	41St. Leonhard/LKH	16	Wormgasse
411	41St. Leonhard/LKH	18	Geidorfplatz
411	41St. Leonhard/LKH	21	Attemsgasse 41 St. Leonhard/LKH
412	41Dürrgrabenweg	22	Attemsgasse 41 Dürrgrabenweg
412	41Dürrgrabenweg	13	Geidorfplatz
412	41Dürrgrabenweg	23	Grabenkirche

Tabelle 44: ÖV-Haltestellen im Verkehrsmodell REF V0 (Linien 58, 63)

ÖPNV - Haltestellen			
Nr	Name	Nr Haltestelle	Name Haltestelle
581	58Mariagrün	26	Lendplatz 58 Mariagrün
581	58Mariagrün	30	Keplerbrücke
581	58Mariagrün	19	Grabenstraße
581	58Mariagrün	16	Wormgasse
581	58Mariagrün	18	Geidorfplatz
581	58Mariagrün	24	Mozartgasse 58 Mariagrün
582	58Hauptbahnhof	32	Mozartgasse 58 Hauptbahnhof
582	58Hauptbahnhof	13	Geidorfplatz
582	58Hauptbahnhof	33	Grabenstraße
582	58Hauptbahnhof	31	Keplerbrücke
582	58Hauptbahnhof	29	Lendplatz 58 Hauptbahnhof
631	63St.Peter	27	Lendplatz 63 St. Peter
631	63St.Peter	30	Keplerbrücke
631	63St.Peter	19	Grabenstraße
631	63St.Peter	16	Wormgasse
631	63St.Peter	18	Geidorfplatz
631	63St.Peter	34	Attemsgasse 63 StPeter
632	63Hauptbahnhof	35	Attemsgasse 63 Hauptbahnhof
632	63Hauptbahnhof	13	Geidorfplatz
632	63Hauptbahnhof	33	Grabenstraße
632	63Hauptbahnhof	31	Keplerbrücke
632	63Hauptbahnhof	28	Lendplatz 63 Hauptbahnhof

8.4 Einstellungen der Fahrverhaltensparameter

Tabelle 45: Übersicht der eingestellten Fahrverhaltensparameter

Parameter	Default	Min	Max	Stufen	Einheit
ax (Mittlerer Stillstandsabstand)	2	0,5	2	0,5; 0,75; 1; 1,5	m
bxadd (Additiver Einfluss Sicherheitsabstand)	2	0,5	2	0,5; 0,75; 1; 1,5	[-]
bxmult (multiplikativer Einfluss Sicherheitsabstand)	3	0,5	4	0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4,	[-]
CC0 (Stillstandabstand)	1,5	0,5	3	0,5; 1,0 ; 2,0; 2,5; 3,0	m
CC1 (Folgeabstand)	0,9 (23)	0,5	1,5	0,5(24); 0,7(25); 1,1(26); 1,3(27); 1,5 (28)	s
CC2 (Längs-Oszillation)	4	1, 5	6	1,5; 2; 3; 5; 6	m
CC3 (Wahrnehmungsschwelle für Folgen)	-8	-15	-6	-6; -10; -12; -14	s
CC4/CC5 (neg./pos. Geschwindigkeitsdifferenz)	-/+ 0,35	-/+0,1	-/+1,5	(-/+) 0,1; 0,5; 1; 1,5	m/s
CC6 (Einfluss der Geschwindigkeit auf Oszillation)	11,44	2	20	2; 5; 10; 15; 20	1/(m*s)
Vorderfahrzeuge	4	1	4	1; 2; 3	#
Min. Nettoweglücke	0,5	0,5	4	1; 2; 3; 4; 5	m
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	-3	-9	-4	-9; -8; -6; -5; -4	m/s ²
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	0,6	0,2	0,8	0,2; 0,4; 0,8	-