Beuth Hochschule für Technik Berlin

Thema:

Messung und Simulation der Kapazität von Ausfahrten an Kreisverkehren

Bachelorarbeit

Fachbereich III – Bauingenieurwesen und Geoinformation
Studiengang Umweltingenieurwesen - Bau

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Johannes Schlaich
Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Axel Leonhardt

vorgelegt von: Felix Liebich

Abgabe: September 2020

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 1
Tabellenverzeichnis 3
1 Einleitung 4
2 Literaturrecherche Kreisverkehrsausfahrten 5
2.1 FGSV-Regelwerke zur Kapazitätsberechnung 5
2.2 Internationale Regelwerke zur Kapazitätsberechnung von Kreisverkehrsausfahrten in den USA 6
2.3 Grundlagen der Erhebung 7
2.4 Grundlagen der Mikrosimulation 9
3 Bestandsanalyse 13
4 Datenerhebung / Verkehrszählung 15
4.1 Paramater 15
4.2 Durchführung 15
4.3 Ergebnis 17
5 Kapazitätsannäherung 18
6 Kreisverkehr Hamburger Platz 24
6.1 Simulationsaufbau 24
6.2 Übersicht der Szenarien 26
6.3 Szenario 1: Ungleichmäßige Fußgängerverteilung - zwei Ausfahrten 27
6.4 Szenario 2: Ungleichmäßige Fußgängerverteilung - drei Ausfahrten 29
6.5 Szenario 3: Gleichmäßige Fußgängerverteilung - vier Ausfahrten 31
6.6 Szenario 4: Erhöhtes Verkehrsaufkommen von Fußgängern und Kfz 33
6.7 Kapazitätsgrenze und deren Auswirkung auf das System 36
7 Praxistaugliche Empfehlungen 42
8 Schlussfolgerung 43
9 Literaturverzeichnis 44
10 Abkürzungsverzeichnis 45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung von Verkehrsströmen im Kreisverkehr.....6
Abbildung 2: Handlungsablauf einer Verkehrserhebung.....8
Abbildung 3: Handlungsablauf einer Mikrosimulation.....10
Abbildung 4: Aufbau des Hamburger Platzes mit der Nummerierung der Zu- und Ausfahrten.....14
Abbildung 5: Hamburger Platz mit Kameraposition und Blickwinkel 16
Abbildung 6: Darstellung der Folgezeitlücke am Beispiel einer Kreisverkehrsausfahrt 19
Abbildung 7: Darstellung der Bruttozeitlücke am Beispiel einer Kreisverkehrsausfahrt 20
Abbildung 8: Messwerte und Regressionsgerade der Bruttozeitlücken.....21
Abbildung 9: Grundkapazität in Abhängigkeit von Fußgängern 23
Abbildung 10: Aufbau Hamburger Platz in PTV Vissim.....24
Abbildung 11: Mittlere Verlustzeit an einer Ausfahrt bei zwei belasteten Ausfahrten...27
Abbildung 12: Mittlere Verlustzeit einer Ausfahrt durch Zuflüsse vom gesamten Kreisverkehr bei zwei belasteten Ausfahrten 28
Abbildung 13: Mittlere Verlustzeit am gesamten Kreisverkehr bei zwei belasteten Ausfahrten.....29
Abbildung 14: Mittlere Verlustzeit an einer Ausfahrt bei drei belasteten Ausfahrten....30
Abbildung 15: Mittlere Verlustzeit einer Ausfahrt durch Zuflüsse vom gesamten Kreisverkehr bei drei belasteten Ausfahrten.....30
Abbildung 16: Mittlere Verlustzeit am gesamten Kreisverkehr bei drei belasteten Ausfahrten.....31
Abbildung 17: Mittlere Verlustzeit an einer Ausfahrt bei vier belasteten Ausfahrten....32
Abbildung 18: Mittlere Verlustzeit einer Ausfahrt durch Zuflüsse vom gesamten Kreisverkehr bei vier belasteten Ausfahrten.....32
Abbildung 19: Mittlere Verlustzeit am gesamten Kreisverkehr bei vier belasteten Ausfahrten.....33
Abbildung 20: Mittlere Verlustzeit bei 100 Kfz/h pro Zufahrt am gesamten Kreisverkehr 34
Abbildung 21: Mittlere Verlustzeit bei 200 Kfz/h pro Zufahrt am gesamten Kreisverkehr 34
Abbildung 22: Mittlere Verlustzeit bei 300 Kfz/h pro Zufahrt am gesamten Kreisverkehr 35
Abbildung 23: Mittlere Verlustzeit bei 400 Kfz/h pro Zufahrt am gesamten Kreisverkehr 35
Abbildung 24: Mittlere Verlustzeit der Szenarien 1, 2 und 3 an einer Ausfahrt.....37
Abbildung 25: Mittlere Verlustzeit einer Ausfahrt durch Zuflüsse von allen Zufahrten der Szenarien 1, 2 und 3.....38

Abbildung 26: Mittlere Verlustzeit der Szenarien 1, 2 und 3 am gesamten Kreisverkehr 39
Abbildung 27: Mittlere Verlustzeit bei simultaner Steigerung von Fußgängern und Kfz-Aufkommen am gesamten Kreisverkehr 40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswertungsergebnisse der Erhebung 17

Tabelle 2: Überblick der Messwerte für die Kapazitätsberechnung.....22

Tabelle 3: Qualitätsstufen nach dem HBS für Regelungen durch Vorfahrtsbeschilderung 26

Tabelle 4: Überschreitung der QSV-Stufe D von Szenario 1,2 und 3 der Fußgänger am gesamten Kreisverkehr (Schriftgröße vereinheitlichen).....40

Tabelle 5: Mittlere Verlustzeiten in Abhängigkeit von Fußgängern und Kfz-Aufkommen 41

1 Einleitung

Kreisverkehre erfreuen sich in vielen Ländern großer Beliebtheit, sowohl innerstädtisch als auch außerhalb. Durch niedrige Unfallraten, einer hohen Leistungsfähigkeit bei mittleren Verkehrsbelastungen und gestalterischen Vorteilen gegenüber lichtsignalgeregelten Knotenpunkten, stellt der Kreisverkehr eine verkehrliche Alternative zu nichtsignalisierten Knotenpunkten dar (ADAC, 2005).

Das Handbuch für die Bemessung von Stadtstraßen (HBS) der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) dient in Deutschland als Leitfaden und beinhaltet ein Berechnungsverfahren für die Bemessung als auch für die Einordnung einer Qualitätsstufe für Kreisverkehre (FGSV, Ausg. 2015g). Das HBS berücksichtigt jedoch nur die Zufahrten und das Verkehrsaufkommen im Kreisverkehr. Es liefert keine konkreten Handlungshinweise zur Kapazitätsberechnung von Ausfahrten oder der Auswirkung von Fußgängern auf den Verkehr innerhalb des Kreisverkehrs.

In dieser Arbeit sollen erste Erkenntnisse zur Kapazität von Kreisverkehrsausfahrten gewonnen werden. Mithilfe einer Verkehrserhebung am Hamburger Platz im Bezirk Prenzlauer Berg in Berlin werden Daten als Grundlage für eine Simulation mit dem Programm PTV Vissim 2020 verwendet. Aus der Simulation werden verschiedene Belastungsszenarien erstellt und daraus praxistaugliche Empfehlungen abgeleitet.

2 Literaturrecherche Kreisverkehrsausfahrten

2.1 FGSV-Regelwerke zur Kapazitätsberechnung

Die FGSV-Regelwerke dienen in Deutschland als Leitfaden für verkehrliche Untersuchungen. In den folgenden Richtlinien sind Regelungen zur entwurfstechnischen Gestaltung von Kreisverkehren zu finden:

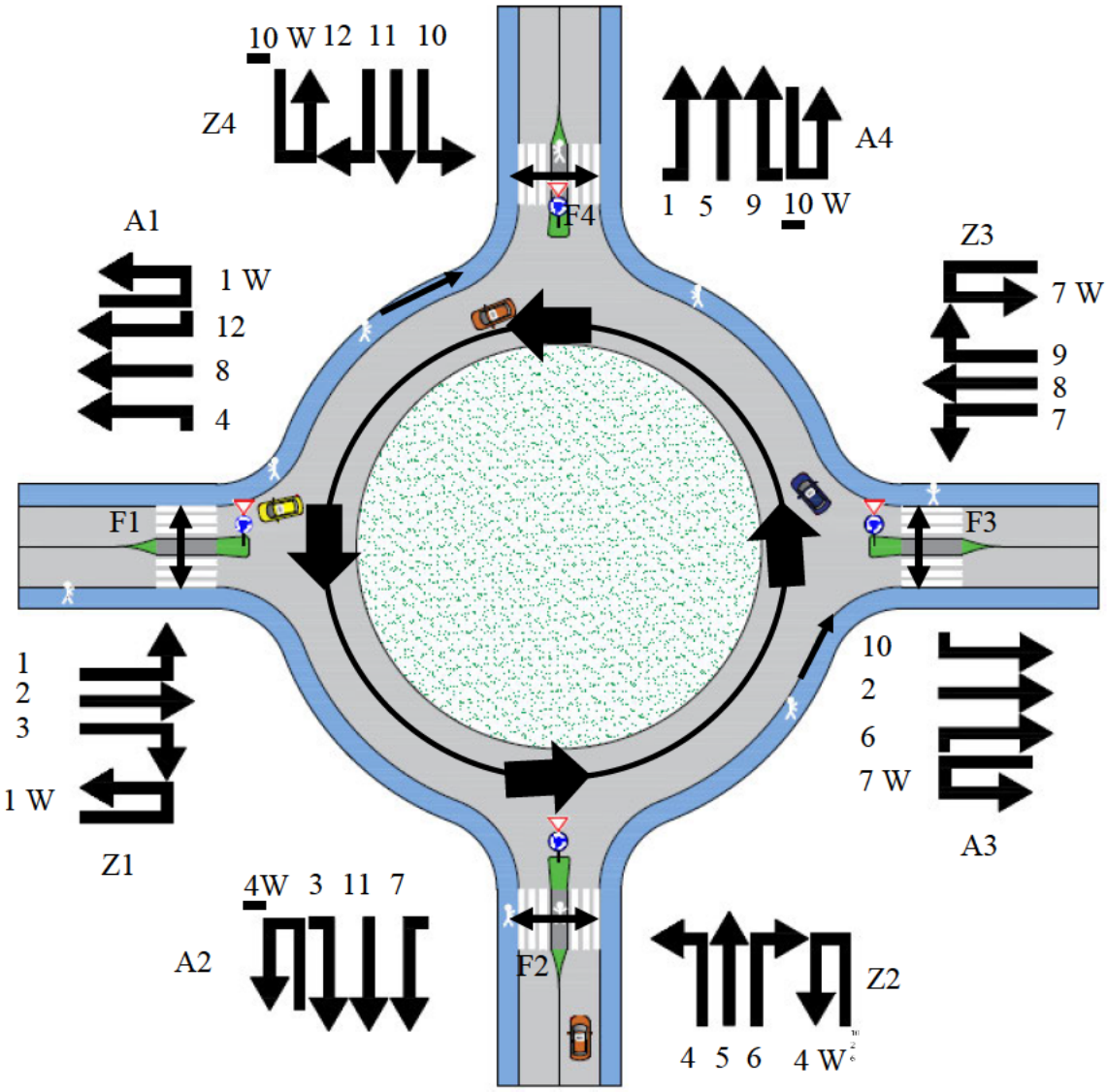
- Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (FGSV, 2012a)
- Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (FGSV, 2013b)
- Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren (FGSV, Ausg. 2006d)
- Arbeitspapier Turbokreisverkehre (FGSV, 2015f)

Diese Regelwerke befassen sich mit der Anlegung von Kreisverkehren, den notwendigen Parametern sowie Variantenvorschlägen. Leistungsfähigkeitsberechnungen für Kreisverkehre sind im HBS zu finden. Das HBS kann nur bei Minikreisverkehren und kleinen Kreisverkehren angewendet werden, die einen Kreisdurchmesser von kleiner 40 m messen. Größere Kreisverkehre sollten mit Programmen simuliert werden, um einer Fehldimensionierung vorzubeugen. Die Rechenschritte für Kreisverkehre nach dem HBS sind wie folgt:

1. Ermittlung der geometrischen Randbedingungen
2. Ermittlung von Bemessungsverkehrsstärken
3. Ermittlung der Grundkapazität der Nebenströme
4. Abminderung der Grundkapazität aufgrund querender Fußgänger
5. Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs für Kfz

Das HBS berücksichtigt im Rechenverfahren unter Punkt vier den Einfluss des Fußgängeraufkommens im Seitenraum oder der Überquerung einer Einfahrt auf die Verkehrsqualität des Pkw. Dafür wird die Grundkapazität vom Pkw mit dem jeweiligen Faktor für Fußgänger abgemindert. Fußgänger im Seitenraum sind jene, die sich auf dem an die Fahrbahn angrenzenden Gehweg bewegen. Das HBS berücksichtigt jedoch nicht die Auswirkungen von Fußgängern auf Ausfahrten von einem Kreisverkehr und ist deshalb nicht darauf anwendbar. Zur besseren Übersicht sind in Abbildung 1 die Verkehrsströme, die in und an einem Kreisverkehr auftreten, dargestellt.

Abbildung 1: Darstellung von Verkehrsströmen im Kreisverkehr



Quelle: Eigene Darstellung

2.2 Internationale Regelwerke zur Kapazitätsberechnung von Kreisverkehrsausfahrten in den USA

Die Regelwerke in Deutschland beinhalten kein konkretes Berechnungsverfahren der Kapazität von Kreisverkehrsausfahrten. Aus diesem Grund wurde im Zuge dieser Arbeit versucht, Informationen zu Kapazitätsberechnungen von Ausfahrten in den United States of America (USA) zu finden. In den USA ist das zuständige Regelwerk für Leistungsfähigkeitsberechnungen das Highway Capacity Manual (HCM). Das Berechnungsverfahren für die Kapazität von einstreifigen Kreisverkehren beruht auf der Methodik der „gap acceptance“. Dabei handelt es sich um die Grenz- und Folgezeitlücke (s. Kapitel 5 Kapazitätsannäherung). Die Berechnung erfolgt in den folgenden Schritten:

1. Ermittlung der geometrischen Randbedingungen sowie der Verkehrsstärke der Zuflüsse
2. Ermittlung der Verkehrsströme in der Kreisfahrbahn für jeden Knotenpunktarm
3. Ermittlung der Kapazität der Einfahrten
4. Beurteilung des Kreisverkehrs nach dem Level of Service (LOS)

Das Verfahren ist dem in Deutschland nicht unähnlich. In Punkt 2 werden die Verkehrsströme analysiert. Dabei wird für jeden einzelnen Knotenpunktarm bestimmt, wie hoch der Zu- und Abfluss an den Zu- und Ausfahrten ist. Für die Berechnung von Punkt 3 verwendet das HCM folgende Formel (National Research Council (U.S), 2000):

$$c_a = \frac{v_c e^{-v_c * \frac{t_c}{3600}}}{1 - e^{v_c * \frac{t_f}{3600}}} \tag{1}$$

Mit

c_a	Grundkapazität	[Kfz/h]
v_c	Verkehrsstärke in der Kreisfahrbahn	[Kfz/h]
t_c	Grenzzeitlücke	[s]
t_f	Folgezeitlücke	[s]

Der Unterschied zu Deutschland ist, dass in Amerika selbst bei einstreifigen Kreisverkehren kein Abminderungsfaktor für Fußgänger besteht. Für die Kreisverkehrsausfahrten existieren jedoch auch im HCM keine Hinweise auf die Kapazität (National Research Council (U.S.), 2000). Im Artikel: „Roundabouts: An Informational Guide“ vom US Department of Transportation ist jedoch vermerkt, dass 1.200 Kfz/h pro Ausfahrt nicht überschritten werden sollten, da das ein Indikator für die Planung eines zweistreifigen Kreisverkehrs wäre (U.S. Department of Administration, 2000). Diese Aussage gleicht sich mit der Empfehlung des HBS. Die Thematik der Kapazität von Kreisverkehrsausfahrten ist demnach auch in den USA noch unerforscht.

2.3 Grundlagen der Erhebung

Die FGSV stellt Handlungsempfehlungen zur Verfügung, die einen Überblick verschaffen, wie eine Erhebung durchzuführen ist und worauf es zu achten gilt (FGSV, Ausg. 2012e). Die folgenden Schritte werden empfohlen (siehe Abbildung 2):

Abbildung 2: Handlungsablauf einer Verkehrserhebung

Quelle: FGSV, Ausg. 2012e, Seite 14 sowie eigene Darstellung

1. Grundkonzipierung
   In der Grundkonzipierung wird als erster Schritt der Erhebungsanlass als auch das Untersuchungsziel definiert. Des Weiteren müssen die Randbedingungen, Erfassungseinheiten und Elemente sowie der Datenschutz geklärt werden. Gegebenenfalls werden erste Hypothesen aufgestellt.

2. Erhebungsvorbereitung
   In der Vorbereitung müssen vor allem die Erhebungsmethode, die Zeit und die Dauer geklärt werden. Es gibt keine universale Erhebungsmethode. Sie ist stets vom Projekt abhängig und muss diesem zugeschnitten werden. Zu der Vorbereitung gehört ebenfalls die Erstellung eines Zählformulars oder eines Fragebogens.

3. Erhebungsorganisation
   Bei der Organisation der Erhebung findet die Abstimmung mit der zuständigen Behörde statt. Dort muss die Genehmigung für die Erhebung eingeholt werden. Des

Weiteren werden Erhebungsunterlagen ggf. für eine erste Orientierung vorab an die Zähler gesendet.

4. Erhebungsdurchführung
   Bei der Durchführung der Erhebung wird oft Fremdhilfe in Anspruch genommen. Deshalb ist auch eine Personaleinweisung in der Organisationsphase unabdinglich. Das führt auch dazu, dass die Erhebungsvorgänge durch das Personal des Büros kontrolliert werden müssen, um das Fehlermaß gering zu halten. Vermerke über Besonderheiten während des Erhebungsvorgangs sind äußerst wichtig, wie z. B. der Vermerk von Baustellen bei Erhebungen zur Parkraumbewirtschaftung. Diese Besonderheiten können eine erhebliche Auswirkung auf die Berechnungen sowie das Resultat haben.

5. Datenaufbereitung
   Der erste Schritt der Datenaufbereitung ist die Prüfung auf Plausibilität. Diese Prüfung ist abhängig von der Art der Erhebung. Sollten Defizite bei der Erhebung entstanden sein (Missverständnis durch Erhebungspersonal), müssen die Fehler ggf. korrigiert werden oder die Erhebung wiederholt werden. Des Weiteren ist es sinnvoll, den Daten eine Gewichtung zuzuordnen bzw. Daten hochzurechnen.

6. Datenanalyse
   Die aufbereiteten Daten werden daraufhin ausgewertet und die Ergebnisse interpretiert. Daraufhin erfolgt die Prüfung der anfangs aufgestellten Hypothesen.

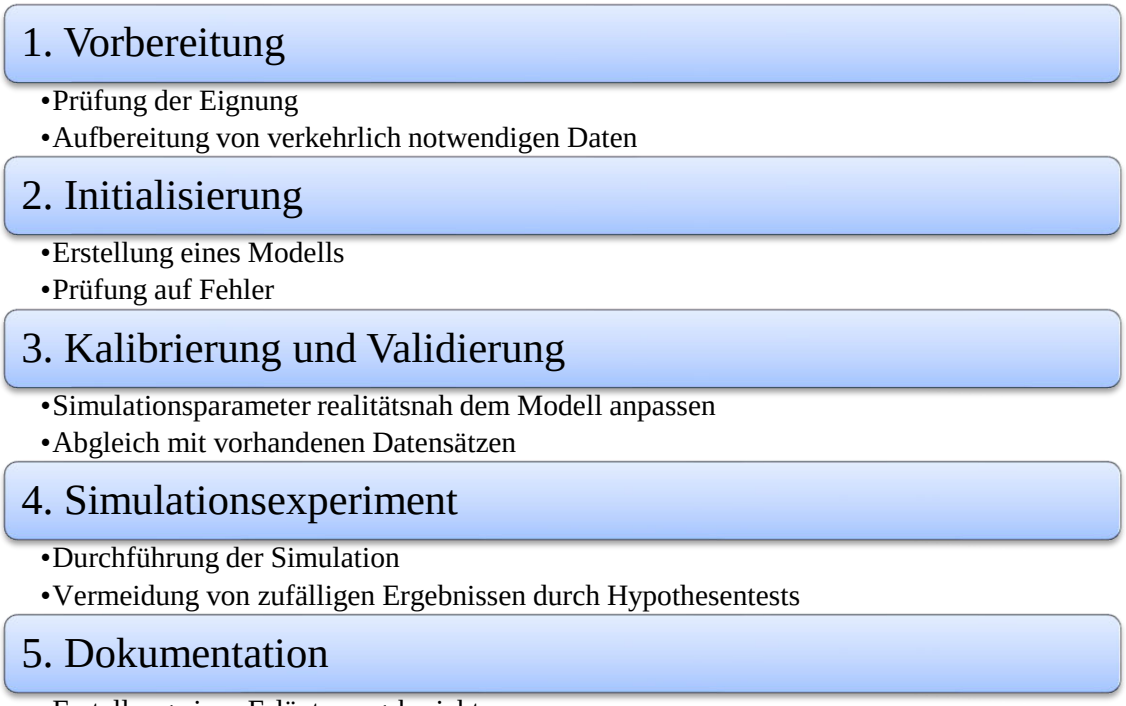
7. Dokumentation
   Schlussendlich werden die analysierten Daten in einem Bericht wiedergegeben und dieser veröffentlicht, sodass die Daten auch anderen zur Verfügung stehen.

2.4 Grundlagen der Mikrosimulation

Die Mikrosimulation dient immer öfter der Untersuchung und Bewertung von verkehrlich komplexen Strukturen. Dabei werden reale, verkehrliche Sachverhalte (z. B. ein Kreisverkehr) in ein Modell konzipiert und die Verkehrsflüsse werden durch die Berechnung der Verhaltensweisen einzelner Fahrzeuge modelliert und realitätsnah dargestellt (FGSV, Ausg. 2006c).

Die FGSV liefert für die Bearbeitung einer Mikrosimulation Handlungsempfehlungen in Form theoretischer als auch praktischer Anwendungshinweise (FGSV, Ausg. 2006c). Sie schlagen folgende Bearbeitungsschritte für eine Simulationsstudie vor (s. Abbildung 3):

Abbildung 3: Handlungsablauf einer Mikrosimulation



Quelle: FGSV, Ausg. 2006c, Seite 12-14, sowie eigene Darstellung

1. Vorbereitung
   Im ersten Schritt muss geprüft werden, ob das gewählte Simulationsmodell für die Aufgabenstellung genutzt werden kann. Ist das der Fall, muss aus der Aufgabenstellung die Aussagegenauigkeit der Ergebnisse entnommen werden, denn daraus ergibt sich eine grobe Anzahl der durchzuführenden Simulationsläufe, um statistisch verwertbare Ergebnisse zu erhalten. Des Weiteren muss eine zeitliche und räumliche Abgrenzung des Untersuchungsgebietes erfolgen. Für die Erstellung einer Simulation gilt es die verkehrsregelnden und geometrischen Randbedingungen, die Verkehrsnachfrage als auch die Daten der verkehrssteuernden Anlagen zu beschaffen und aufzubereiten.

2. Initialisierung
   Die Initialisierung befasst sich mit der Erstellung eines fehlerfreien und der Aufgabenstellung entsprechenden Modells, sowohl in der Verkehrsinfrastruktur als auch in der Verkehrsnachfrage. Dabei sollte zuerst die Infrastruktur und danach die Verkehrsnachfrage erstellt werden. Sobald das Modell besteht, sollte es auf Fehler geprüft werden. Im Vordergrund steht dabei die richtige Darstellung des Modells und anschließend durch Testläufe der Simulation die Behebung von Fehlern, die visuell oder durch das Programm erkannt werden. Die Fehler sollten vor dem Start der ergebnisbasierten Simulation behoben werden, da dies sonst zur Verfälschung der Ergebnisse führen kann.

3. Kalibrierung und Validierung
   In diesem Arbeitsschritt sollte zuerst die Kalibrierung erfolgen. Dabei geht es darum, die Simulationsparameter so realitätsnah wie möglich den verkehrlichen Rahmenbedingungen im Untersuchungsgebiet anzupassen. Daraufhin folgt die Validierung, die mit den wichtigsten Teil in der Bearbeitung darstellt. Fehlt die Validierung des Modells, ist dessen Aussagekraft eingeschränkt, denn die Validierung ist der Beleg dafür, dass das Modell mit den verwendeten Parametern wenigstens einen empirischen Datensatz korrekt darstellt. Für den Abgleich existieren Standardparametersätze, Kombinationen von Paramatern aus anderen Studien oder solche, die sich aus der Kalibrierung ergeben haben.

4. Simulationsexperiment
   Erst in diesem Schritt beginnt die Anwendung der Simulation. In der Simulation werden verschiedene Szenarien je nach Aufgabenstellung geprüft und anschließend miteinander verglichen. Für die korrekte Bewertung der Ergebnisse müssen anschließend statistische Hypothesentests durchgeführt werden. Diese sichern ab, dass keine zufälligen Schwankungen oder systematischen Unterschiede das Ergebnis verfälschen.

5. Dokumentation
   Die Simulationsstudie wird mit einem Erläuterungsbericht abgeschlossen, in dem die Vorgehensweise der Modellierung als auch die Ergebnisse beschrieben werden. Dabei ist es besonders wichtig, den Bericht nachvollziehbar zu gestalten. Im Fokus sollte dabei Punkt 3 stehen: die Kalibrierung und Validierung, das Fehlermaß als auch die Ergebnisdarstellung der Simulation.

Für die Bestimmung der Anzahl der durchzuführenden Simulationsläufe wird folgende Formel herangezogen (FGSV, Ausg. 2006c):

$$n \geq \frac{t(\alpha, n-1)^2 \cdot s^2}{C^2} \tag{2}$$

Mit

n	Anzahl der erforderlichen Simulationsläufe	[-]
t (a, n – 1)	Wert aus der Student-t-Verteilung für die Wahrscheinlichkeit eines einseitigen Fehlers	[-]
s	Standardabweichung der untersuchten Kenngröße	[-]
C	gewünschtes Konfidenzintervall bzw. die Differenz der Ergebnisse zweier Simulationsexperimente, die noch als signifikant gelten	[-]

Die Ermittlung von n erfolgt iterativ. Dafür muss vorab eine Schätzung der Standardabweichung der Simulationsläufe abgegeben werden und das Konfidenzniveau sowie das Konfidenzintervall gewählt werden. Wenn n größer oder wenigstens gleich der gewählten Student-t-Verteilung ist, wurde die Anzahl der notwendigen Simulationsläufe bestimmt (FGSV, Ausg. 2006c).

3 Bestandsanalyse

Es wurden acht verschiedene Kreisverkehre in Berlin auf ihre Eignung für eine Erhebung und Simulation untersucht. Für die Bestimmung eines in Frage kommenden Kreisverkehrs wurden die Kreisverkehre nach den geometrischen Randbedingungen des Merkblatts für die Anlage von Kreisverkehren (FGSV, 2006d) stichprobenhaft geprüft. Darunter fielen:

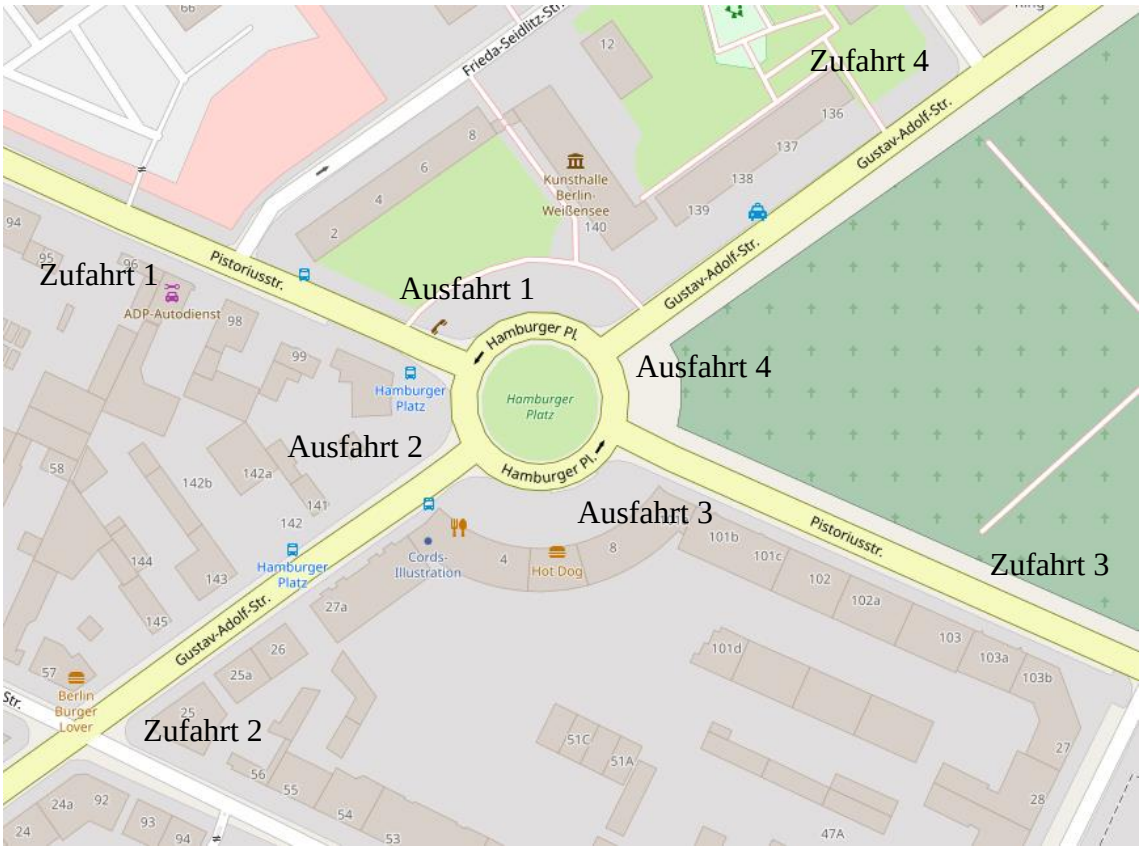
- die Fahrstreifenanzahl der Kreisfahrbahn mit einem Fahrstreifen
- die Fahrstreifenanzahl der Ein- und Ausfahrten mit einem Fahrstreifen
- die senkrechte Heranführung der Fahrbahnen an den Kreisverkehr
- der Außendurchmesser
- die Existenz von Fußgängerüberwegen in ca. 5m Abstand der Kreisfahrbahn
- sowie einer kreisrunden Kreisfahrbahn

Anhand dieser Kriterien blieben nur noch vier von acht Kreisverkehren übrig. An den übrigen wurde jeweils eine Stichprobenzählung von zehn Minuten vom Fußgänger- und Kfz-Aufkommen durchgeführt. Die Zählungen erfolgten an einem Dienstag und an einem Donnerstag zwischen 8-10 Uhr im Juni 2020, zur Zeit der Ausgangsbeschränkungen zu Beginn des Covid-19-Virus in Deutschland, was vermutlich auch eine Minimierung des Kfz- sowie Fußgänger-Verkehrs zur Folge hatte. Die Stichproben wurden anschließend hochgerechnet. Die höchsten Verkehrsmengen wies der Hamburger Platz im Bezirk Prenzlauer Berg auf. Eine Probezählung über zwei Stunden ergab ein Verkehrsaufkommen von ca. 400 Kfz/h und ca. 65 Fg/h an einer Ausfahrt. Die Zählung hat unter anderem ergeben, dass der Kreisverkehr den normalen Belastungszustand fassen kann, da kein Rückstau zu erkennen war. Die Kfz-Verkehrsstärkenkarte der Verkehrslenkung Berlin (VLB) zeigt eine durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) von ca. 13.500 Kfz/d (VLB, 2014) in der Pistoriusstraße. Diese und die Gustav-Adolf-Straße sind die beiden Zufahrtsstraßen des Hamburger Platzes (s. Abbildung 5). Der südliche Teil der Gustav-Adolf-Straße besitzt eine DTV von 5.300 Kfz/d, der nördliche Teil eine DTV von 7.600 Kfz/d. Damit sind die Ausfahrten A1 und A3 stärker belastet als A2 und A4. Die Kfz-Belastung der Pistoriusstraße ergibt einen Durchschnittswert von ca. 562 Kfz/h, da in der Erhebung 400 Kfz/h für die Ausfahrt erhoben wurden, diente das als Bestätigung für ein hohes Verkehrsaufkommen, am Kreisverkehr und festigte die finale Auswahl für den Hamburger Platz.

Die geometrischen Bedingungen des Kreisverkehrs entsprechen den oben genannten Kriterien und sind im Folgenden mit Zahlen aufgeführt. Der Hamburger Platz hat vier

einstreifige Zu- und Ausfahrten, die senkrecht auf die Kreisfahrbahn treffen. Die Ein- und Ausfahrten werden durch Fußgängerüberwege gekreuzt, die sich ca. 4,5 m von der Kreisfahrbahn entfernt befinden. Die einstreifige Kreisfahrbahn weist eine Breite von 6 m auf. Mit einem Außendurchmesser von 50 m ist dieser der einzige Wert, der von den geometrischen Randbedingungen abweicht. Das Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren rät zu einem Außendurchmesser von kleiner 40 m (FGSV, 2006d). Trotz der einen nicht erfüllten Randbedingung wurde der Kreisverkehr als Vorlage für die Mikrosimulation gewählt, da dieser dennoch die besten Voraussetzungen für ein repräsentatives Ergebnis gewährleistet hat. Die anderen Kreisverkehre haben in den Probezählungen zu niedrige Verkehrsstärken bewiesen, sodass vermutlich weniger Messlücken entstanden wären.

Abbildung 4: Aufbau des Hamburger Platzes mit der Nummerierung der Zu- und Ausfahrten



Quelle: OpenStreetMap-Mitwirkende, sowie eigene Darstellung, letzter Zugriff: 04.06.2020

4 Datenerhebung / Verkehrszählung

Für die Bestimmung der Kapazität von Kreisverkehrsausfahrten wurde im Zuge dieser Arbeit eine Datenerhebung am Kreisverkehr Hamburger Platz im Bezirk Prenzlauer Berg in Berlin durchgeführt.

4.1 Paramater

Für die Datenerhebung war es notwendig, die Faktoren zu bestimmen, die eine Auswirkung auf die Kapazität von Ausfahrten haben könnten. Die FGSV-Regelwerke sowie ein erster Simulationslauf erbrachten einige Erkenntnisse über mögliche Einflussfaktoren. Darunter fallen z. B.:

- Geschwindigkeit von Fußgängern
- Verkehrsstärke von Fußgängern
- Gruppen von Fußgängern
- Zeitabstand zwischen den Fußgängern
- Verteilung der Fußgänger auf die Ausfahrten
- Verkehrsstärke der Kraftfahrzeuge
- Abstände zwischen den Kraftfahrzeugen bei der Ausfahrt aus dem Kreisverkehr

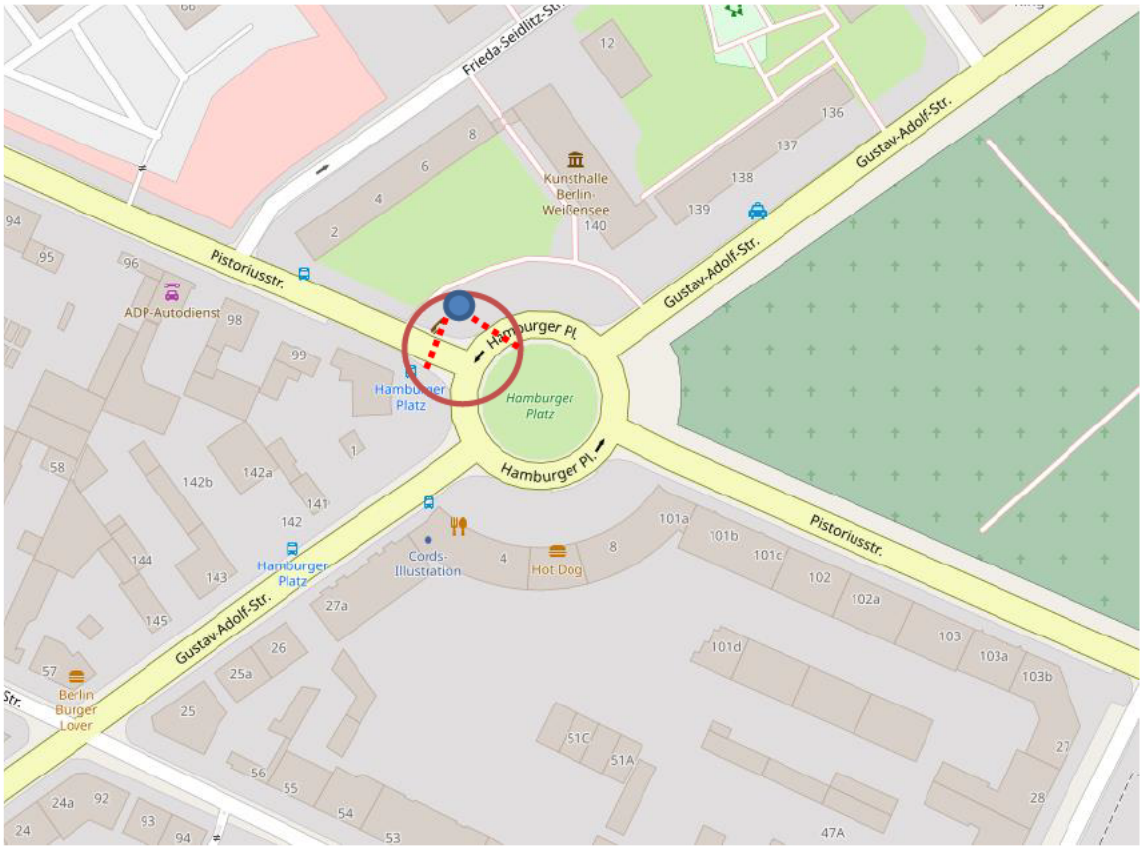
Bei näherer Analyse eines Kreisverkehrs ergäben sich sicherlich noch weitere Faktoren, die einen Einfluss auf die Kapazität der Ausfahrt hätten. Dies würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit überschreiten, sodass für diesen Fall ggf. weitere Forschung betrieben werden sollte.

4.2 Durchführung

Für die genauere Bestimmung der Parameter wurde eine Videoanalyse am Kreisverkehr durchgeführt. Die Videoanalyse war notwendig, da beispielsweise der Zeitabstand zwischen den Fußgängern sowie Kraftfahrzeugen gemessen werden musste. Zeitgleich sollte die Anzahl der Fußgänger ermittelt werden. Diese Faktoren schlossen eine klassische Verkehrserhebung aus. Die Videoanalyse wurde an vier aufeinanderfolgenden Tagen von Dienstag bis Freitag zwischen 08:00 – 10:00 Uhr durchgeführt. Es wurde nur Ausfahrt 1 erhoben (s. Abbildung 4). Für die Videoaufnahme wurde die Kamera CX 625 Handycam von Sony verwendet und wie in Abbildung 5 positioniert. Das Blickfeld der Kamera erfasste den Fußgängerüberweg sowie drei Kraftfahrzeuge auf der

Kreisfahrbahn, sodass ggf. ein Rückstau auf den Aufnahmen erkannt werden konnte (s. Abbildung 5). Daraufhin wurden die Aufnahmen analysiert und die herausgefilterten Daten ausgewertet.

Abbildung 5: Hamburger Platz mit Kameraposition und Blickwinkel



Quelle: OpenStreetMap-Mitwirkende, sowie eigene Darstellung, letzter Zugriff: 04.06.2020

Legende

Kameraposition | Betrachtete Ausfahrt | Blickwinkel

4.3 Ergebnis

Die Ergebnisse der Erhebung zeigen eine im Verkehr gängige Auslastung durch Kfz an einem Kreisverkehr. Die Spitzenstunde von 404 Kfz/h lag an Tag 4 zwischen 9 – 10 Uhr. Dennoch lässt sich aus den verschiedenen Zeiten keine Tendenz erkennen, welche der zwei beobachteten Stunden stärker frequentiert ist. Vor allem da die eigentlichen Zähltage Dienstag (Summe: 729) und Donnerstag (Summe: 763) ein ähnliches Verkehrsaufkommen aufweisen wie Mittwoch (Summe: 776) und Freitag (Summe: 760). Die Spitzenstunde von 91 Fg/h für die Fußgänger lag ebenfalls an Tag 4 zwischen 9 – 10 Uhr. Bei den Fußgängern zeigt sich deutlich, dass das Verkehrsaufkommen zwischen 9 – 10 Uhr höher ist als zwischen 8 – 9 Uhr. Die Durchschnittsbelastung der betrachteten Ausfahrt beträgt ca. 379 Pkw/h und ca. 78 Fg/h (s. Tabelle 1). Der Schwerverkehrsanteil liegt im Durchschnitt bei 3,2 %. Das Fußgängeraufkommen ist jedoch etwas zu niedrig, da es zu nicht ausreichenden Aufeinandertreffen von Kraftfahrzeugen und Fußgängern kam, was die Anzahl der Messlücken negativ beeinflusst hat. Die Brutto- und Folgezeitlücken sind in Kapitel 5 näher erläutert. In der Videoauswertung ist zu beobachten, dass die Fußgänger und die Kraftfahrzeuge oft separat zueinander agiert haben. Das heißt, es gab viele aufeinanderfolgende Kraftfahrzeuge, im gleichen Moment jedoch keine querenden Fußgänger. Wenn ein Fußgängerstrom die Ausfahrt querte, gab es teilweise keine Kraftfahrzeuge, da diese oft stoßweise in einer Kolonne fuhren. Bei ca. 1,3 Fg/min und den daraus resultierenden 99 regulären Messlücken, ist die Anzahl der Fußgänger zu niedrig für ein repräsentatives Ergebnis. Das kann unter anderem am Zeitpunkt der Messung liegen, da diese während der Ausgangsbeschränkungen des Beginns des Covid-19-Virus stattgefunden hat, oder an zu kurzen Erhebungszeiträumen. Gegebenenfalls sollten weitere Nachforschungen betrieben und eine Vollerhebung durchgeführt werden.

Tabelle 1: Auswertungsergebnisse der Erhebung

Datum	Zeitraum / Uhrzeit	Kfz/h	Fg/h	Schwer-verkehr	Folgezeit-lücke	Bruttozeit-lücke	Messlücken Gesamt
Tag 1: 26.05.2020	8:00 - 9:00	352	68	10	4	6	10
	9:00 - 10:00	377	82	16	9	12	21
Tag 2: 27.05.2020	8:00 - 9:00	403	75	9	5	6	11
	9:00 - 10:00	373	79	12	4	6	10
Tag 3: 28.05.2020	8:00 - 9:00	387	70	14	4	7	11
	9:00 - 10:00	376	81	17	6	8	14
Tag 4: 29.05.2020	8:00 - 9:00	356	79	9	5	7	12
	9:00 - 10:00	404	91	14	4	6	10
Durchschnitt		379	78	13	/	/	/
Summe		/	/	/	41	58	99

Quelle: Eigene Darstellung

5 Kapazitätsannäherung

Das HBS beinhaltet keine konkrete Berechnung für die Kapazität an Kreisverkehrsausfahrten. Dennoch kann mit dem HBS die Grundkapazität eines Verkehrsstroms für einen vorfahrtsgeregelten Knotenpunkt ermittelt werden. Dies ist jedoch nur eine grobe Annäherung und berücksichtigt zu wenige Faktoren, die noch weitere Auswirkung haben könnten. Die Formel für die Berechnung der Kapazität eines einzelnen Verkehrsstroms nach dem HBS sieht wie folgt aus (FGSV, Ausg. 2015g):

$$Gpe = \frac{3600}{t_f} * e^{-\frac{q_p}{3600}*(t_g - \frac{t_f}{2})} \tag{3}$$

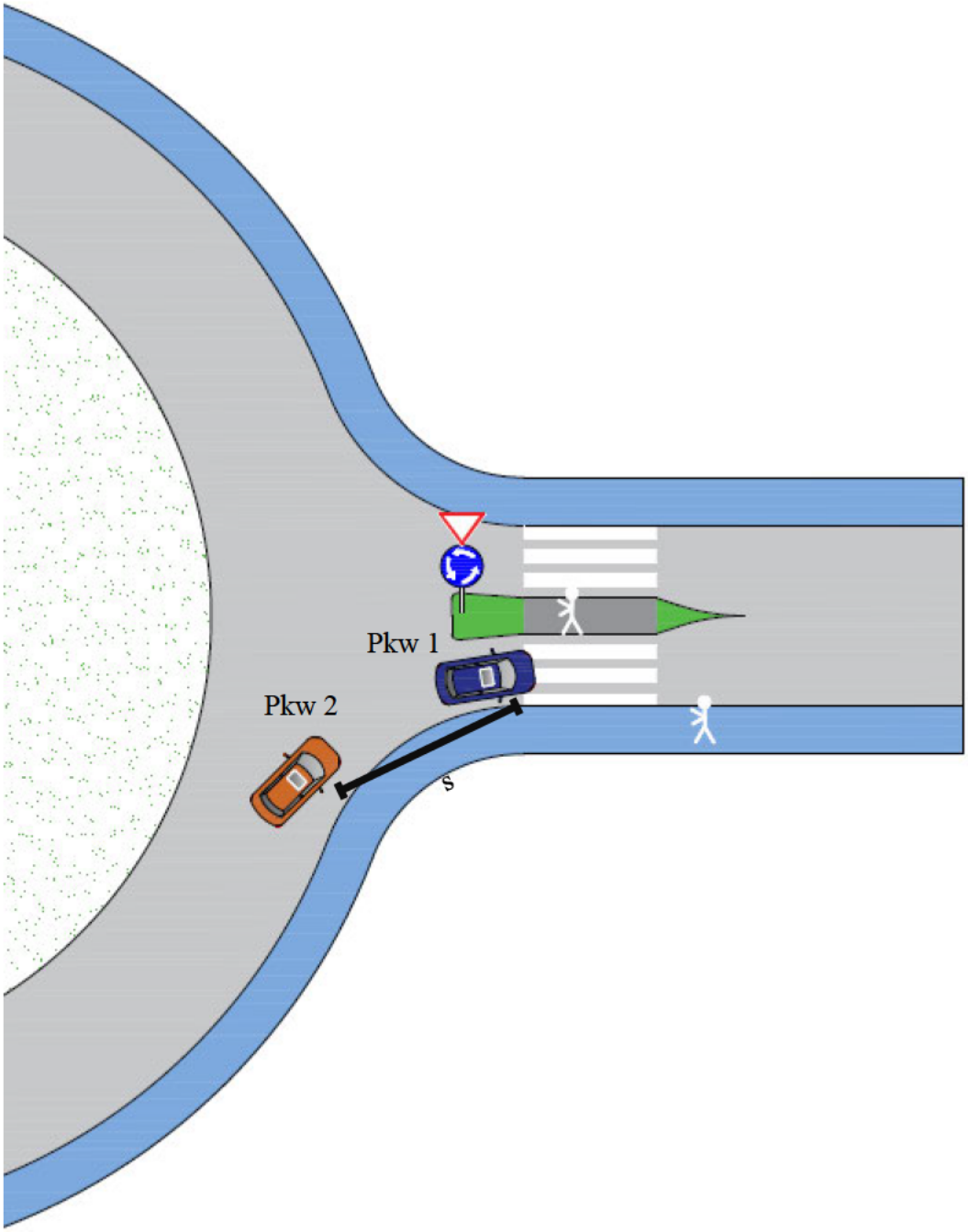
Mit

G_{pe}	Grundkapazität des Nebenstroms	[Pkw-E/h]
t_f	mittlere Folgezeitlücke	[s]
t_g	mittlere Grenzzeitlücke	[s]
q_p	Verkehrsstärke der maßgebenden Hauptströme	[Fz/h]

Mit dieser Formel lässt sich annäherungsweise die Grundkapazität einer Kreisverkehrsausfahrt bestimmen. Wird der Fußgängerstrom als Verkehrsstärke des maßgebenden Hauptstromes im Kreisverkehr betrachtet und die Fahrbahn des Kreisverkehrs als Nebenstrom, kann mithilfe der mittleren Folge- und Grenzzeitlücke die Grundkapazität des Nebenstroms, demnach die der Ausfahrt, bestimmt werden. Dabei dürfen nur die Pkw betrachtet werden, die die Ausfahrt nutzen.

Bei der Folgezeitlücke wird gemessen, wie viel Zeit zwischen zwei Fahrzeugen liegt, die zwischen demselben Fußgängerstrom die Ausfahrt nutzen. Dabei wird ab demselben Bezugspunkt gemessen, nämlich der Überfahrung des Vorderrads des Pkw des Fußgängerüberweges an der Kreisverkehrsausfahrt. Die Messung beginnt, wenn Pkw 1 den Fußgängerüberweg mit dem Vorderrad überfährt, und endet, wenn Pkw 2 in der gleichen Lücke im Fußgängerstrom ebenfalls den Fußgängerüberweg mit dem Vorderrad überfährt (s. Abbildung 6).

Abbildung 6: Darstellung der Folgezeitlücke am Beispiel einer Kreisverkehrsausfahrt



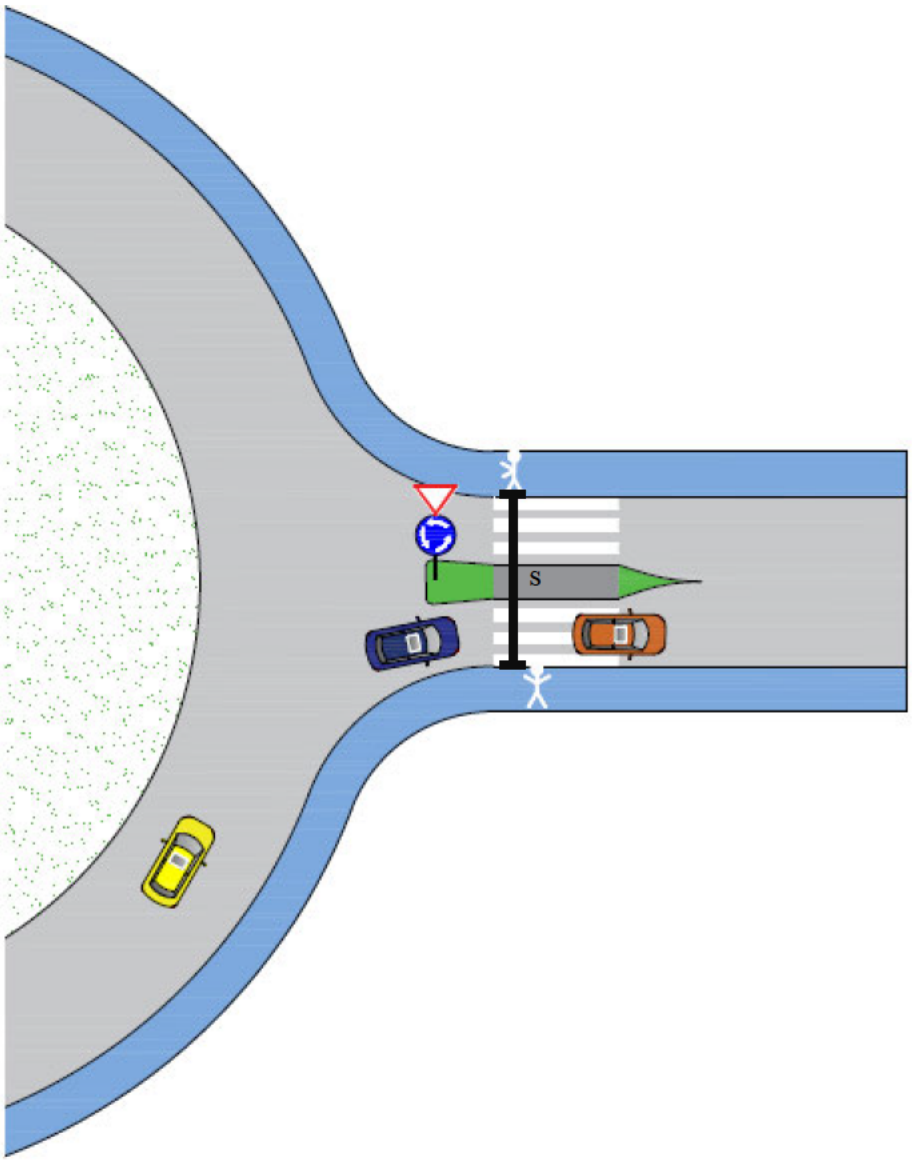
Quelle: Eigene Darstellung

Die Folgezeitlücke ergibt sich aus dem Median der in der Erhebung aufgenommenen Messlücken für die Folgezeitlücke. Es ergibt sich ein Wert von 3 s.

Zur Ermittlung der Grenzzeitlücke werden die Bruttozeitlücke, die Nullzeitlücke und die mittlere Zeitlücke für ein Fahrzeug benötigt. (s. Abbildung 7). Die Grenzzeitlücke ergibt sich aus dem Mittelwert der Nullzeitlücke und der mittleren Zeitlücke. Die Bruttozeitlücke dient als Grundlage für die Ermittlung der Nullzeitlücke und der mittleren Zeitlücke.

Bei der Messung am Kreisverkehr wurden 58 Bruttozeitlücken gemessen (s. Tabelle 1). Die Bruttozeitlücke ist die Lücke zwischen zwei Fußgängern, die mindestens ein Pkw zur Durchfahrt nutzt. Die Messung erfolgte jeweils beim Betreten der Fahrbahn des Fußgängerüberweges in der Ausfahrt - dabei wurde auch ermittelt, wie viele Fahrzeuge die Lücke zwischen den Fußgängern nutzen. Für die Messung gilt die Bedingung, dass nach dem zweiten Fußgänger ein weiteres Fahrzeug die Ausfahrt nutzen muss (s. Abbildung 7), damit eine kontinuierliche Nachfrage an der Ausfahrt besteht und die Lücke gewertet werden kann.

Abbildung 7: Darstellung der Bruttozeitlücke am Beispiel einer Kreisverkehrsausfahrt

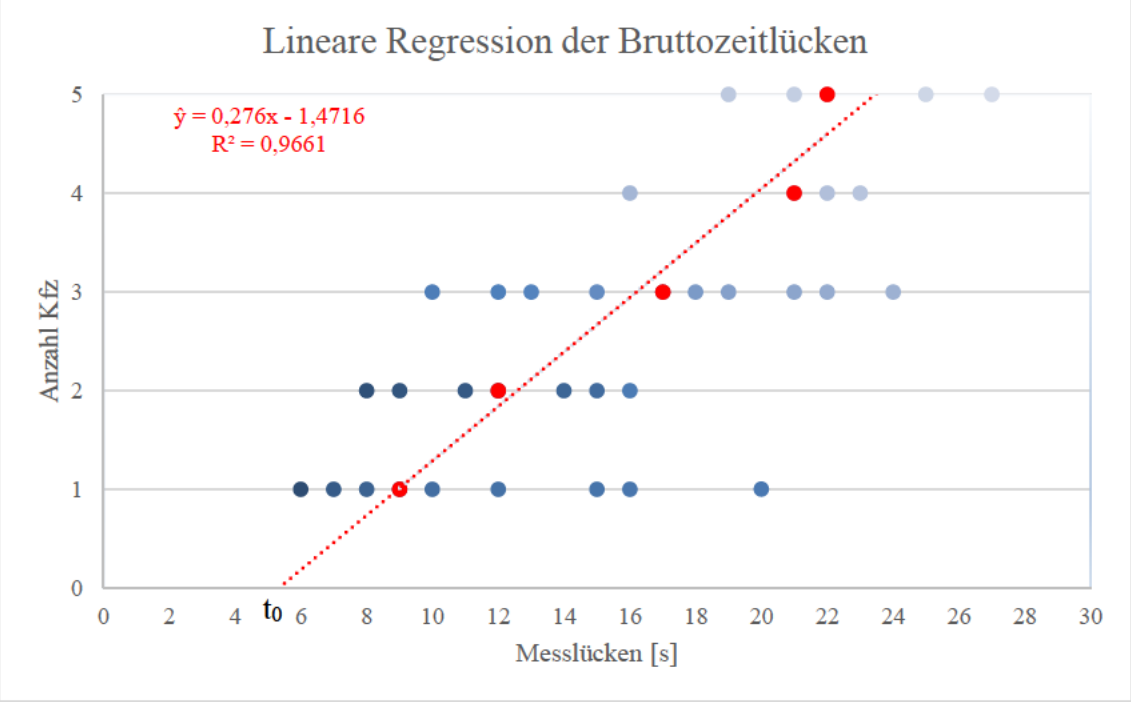


Quelle: Eigene Darstellung

Für die Bestimmung der Nullzeitlücke werden, wie von Siegloch (Siegloch, 1973 zitiert nach, Hubberten et al., 2009) empfohlen, die Messwerte der jeweiligen Anzahl an

Fahrzeugen gemittelt. Anschließend wird mit den gemittelten Werten eine lineare Regression durchgeführt (s. Abbildung 8).

Abbildung 8: Messwerte und Regressionsgerade der Bruttozeitlücken



Quelle: Eigene Darstellung

Legende

Messlücken

Median der Messwerte

Regressionsgerade

Nach Siegloch (Siegloch, 1973 zitiert nach, Hubberten et al., 2009) ergibt sich die Nullzeitlücke t_0 aus der Lücke im Hauptstrom, die von keinem in vorderster Warteposition haltenden Fahrzeuges genutzt wird. Diese entspricht dem Schnittpunkt der Regressionsgeraden auf der x-Achse von Abbildung 8 und liegt bei 5,4 s.

Die mittlere Zeitlücke ist der Mittelwert aller Zeitlücken eines Fahrzeugs. Das heißt es wird der Mittelwert von allen Messwerten gebildet, bei dem ein Fahrzeug die Lücke in einem Fußgängerstrom genutzt hat. Die mittlere Zeitlücke kann anschließend entweder rechnerisch ermittelt oder aus dem Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der x-Achse für ein Kfz in Abbildung 8 abgelesen werden. Die rechnerische als auch die grafische Lösung liegen bei 9 s.

Der Mittelwert der Nullzeitlücke von 5,4 s und der Mittelwert der mittleren Zeitlücke von 9 s für ein Fahrzeug ergibt letztendlich die Grenzzeitlücke. In diesem Fall liegt die

Grenzzeitlücke bei 7,2 s. Das ist die kleinste Lücke eines wartepflichtigen Fahrzeugs, die ein Kraftfahrzeug im Fußgängerstrom nutzen kann.

Dabei ließ sich in den Videoaufnahmen beobachten, dass umso größer das Fußgängeraufkommen ist, desto geringer wird die Grenzzeitlücke. Je mehr Fußgänger die Ausfahrt queren und je kleiner die Lücken im Fußgängerstrom werden, desto kleinere Lücken wird der Kfz-Strom nutzen. Im Umkehrschluss heißt das auch, je weniger Fußgänger die Ausfahrt queren, desto eher ist der Kfz-Fahrer bereit zu warten, falls ein Fußgänger die Ausfahrt quert.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Messlücken zusammenfassend aufgelistet.

Tabelle 2: Überblick der Messwerte für die Kapazitätsberechnung

	Bruttozeit-lücken	**Nullzeitlücke t_0 [s]**	**mittlere Fahrzeuglücke [s]**	**Grenzzeit-lücke t_g [s]**	**Folgezeit-lücke t_f [s]**
Ergebnis	58	5,4	9	7,2	3

Quelle: Eigene Darstellung

Für die Nutzung der Werte der Grenz- und Folgezeitlücke wird Formel (**3**) herangezogen und angepasst. Dafür wird der Fußgängerstrom als maßgebende Hauptstrombelastung q_{Fg} betrachtet. Die Formel (**3**) sieht angepasst wie folgt aus:

$$G_{pe} = \frac{3600}{t_f} * e^{-\frac{q_{Fg}}{3600}*(t_g - \frac{t_f}{2})} \tag{4}$$

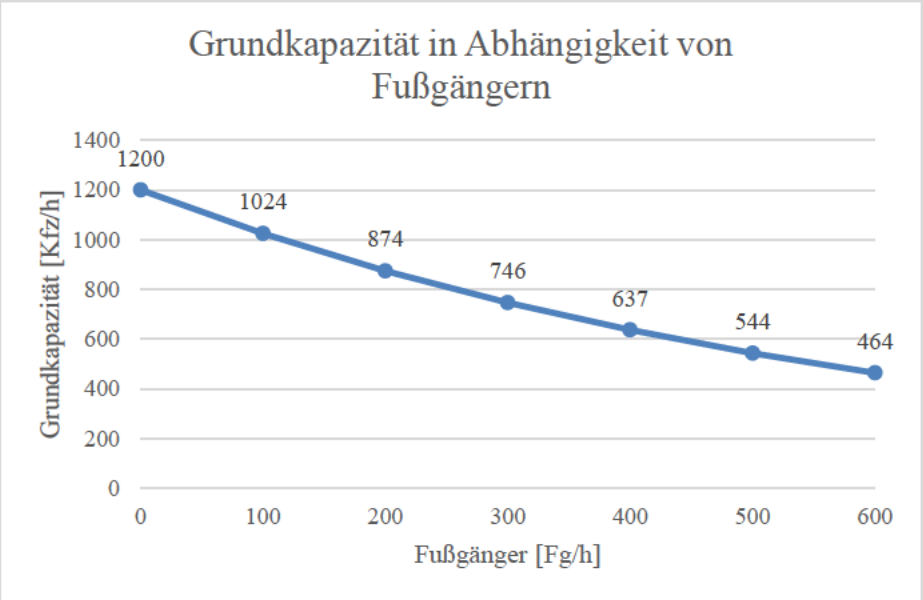
Mit

G_{pe}	Grundkapazität	[Pkw/h]
t_f	Folgezeitlücke	[s]
t_g	Grenzzeitlücke	[s]
q_{Fg}	maßgebende Hauptstrombelastung (Fußgänger)	[Fg/h]

Mit dieser Formel lässt sich nun die Grundkapazität in Abhängigkeit querender Fußgänger für eine Ausfahrt im Kreisverkehr bestimmen. Aus dem Ergebnis der Formel und den Werten aus der Tabelle 1 lässt sich Abbildung 9 erstellen.

Diese zeigt eine Grundkapazität von 1.200 Kfz/h bei einer Fußgängerbelastung von 0 Fg/h. Das entspricht dem Orientierungswert von 1.200 – 1400 Kfz/h, den das HBS für Kreisverkehrsausfahrten vorgibt (FGSV. 2006g). Mit steigender Fußgängeranzahl sinkt die Kapazität der Ausfahrt stetig.

Abbildung 9: Grundkapazität in Abhängigkeit von Fußgängern



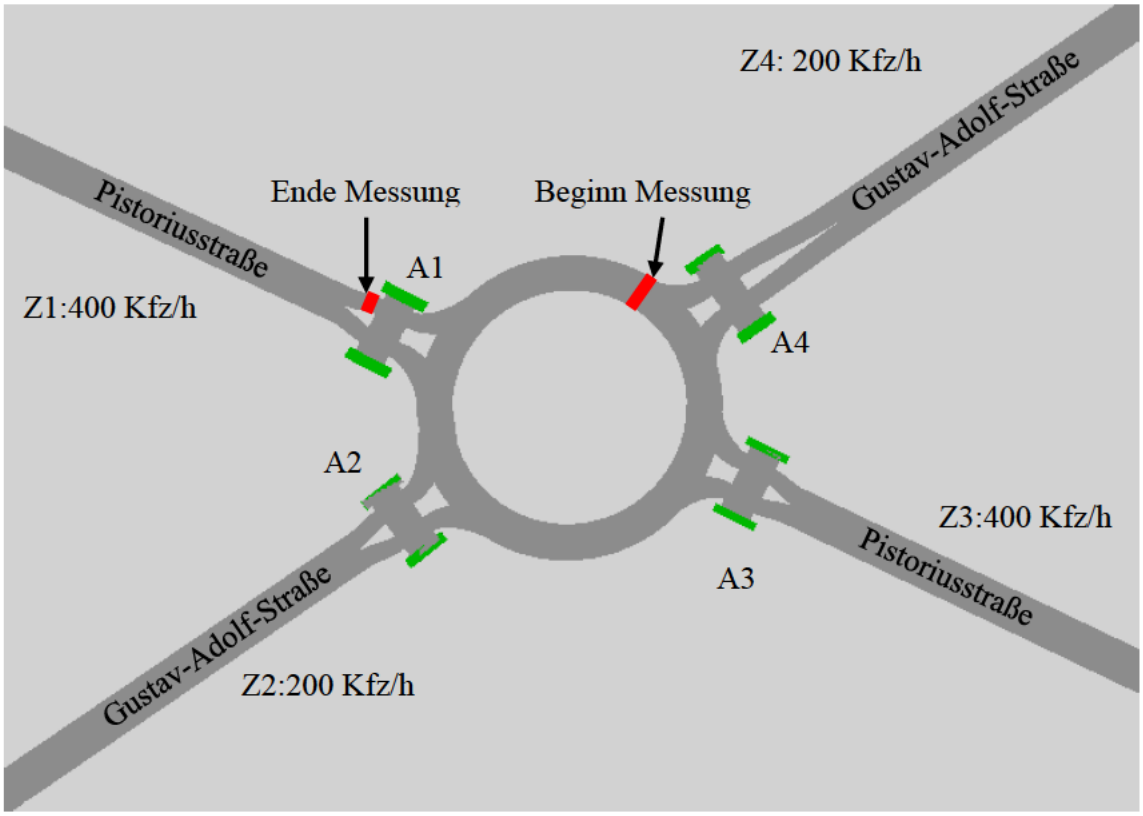
Quelle: Eigene Darstellung

6 Kreisverkehr Hamburger Platz

6.1 Simulationsaufbau

Die Simulation wurde anhand eines Luftbildes in PTV Vissim erstellt. Die Dimensionierung des Kreisverkehrs entspricht der Bestandsanalyse. Die Formel (**2**), zur Berechnung der Simulationsläufe, ergab eine Simulationsanzahl von 15. In der Simulation wurden alle vier Ausfahrten betrachtet. Es wurde ein Fahrzeugzufluss von Z1= 400 Kfz/h, Z2= 200 Kfz/h, Z3= 400 Kfz/h und Z4= 200 Kfz/h für die Szenarien 1, 2 und 3 gewählt (s. Abbildung 10). Dieser Zufluss entspricht einer ähnlichen Verteilung wie der in der der Verkehrsstärkenkarte von der VLB (VLB, 2014), sodass in der Pistoriusstraße höhere Zuflüsse in den Kreisverkehr einfahren als in der Gustav-Adolf-Straße.

Abbildung 10: Aufbau Hamburger Platz in PTV Vissim



Quelle: Eigene Darstellung

Die Verteilung der Verkehrsflüsse wurde so gewählt, dass in jede Ausfahrt 30% des Zuflusses abfließen, mit der Ausnahme der wendenden Fahrzeuge. Dort fließen 10% ab. Als Grundlage für die Fußgängerbelastung wurden die erhobenen Daten für die Ausfahrt A1 herangezogen und als Referenzwert gewählt. Da in der Erhebung nur eine Ausfahrt betrachtet wurde, wurden die Werte für die anderen Ausfahrten angenommen. Das Fußgängeraufkommen wurde entsprechend der Erhebung von ca. 80 Fg/h auf alle Querungsmöglichkeiten gleich verteilt, sodass stets eine Fußgängerbelastung am

Kreisverkehr gegeben ist. Die Kraftfahrzeuge sind bei der Querung von Fußgängern in den Ausfahrten wartepflichtig. In den Ausfahrten sind Langsamfahrbereiche eingerichtet, die eine Wunschgeschwindigkeitsverteilung von 20 km/h für Pkw und 15 km/h für Lkw ansetzen. Zudem wird zu den Konfliktflächen zwischen Fußgängern und Kfz an den Ausfahrten eine Lücke zum Fußgängerüberweg von 1 m eingehalten. Die Wunschgeschwindigkeitsverteilung auf freien Strecken für den Kfz-Verkehr beträgt 48 - 58 km/h, für die Fußgänger wurden 3,3 – 5 km/h angesetzt (Weidmann, 1993). Aufbauend auf den beschriebenen Werten wurden in den folgenden Szenarien die Belastungen schrittweise erhöht bzw. die Belastungen anders verteilt.

Im Fokus der Szenarien stand die mittlere Verlustzeit der Kraftfahrzeuge. Die mittlere Verlustzeit ist der Referenzwert für die Leistungsfähigkeit nach dem Highway Capacity Manual (HCM) in den USA, welches dort als Regelwerk für die Leistungsfähigkeitsberechnung verwendet wird, während sich die Leistungsfähigkeit in Deutschland an der mittleren Wartezeit orientiert - beide Werte sagen aber das gleiche aus und sind demnach vergleichbar (Graevemeyer, 2018). Im Folgenden wird stets der Begriff der mittleren Verlustzeit gewählt. Die mittlere Verlustzeit ergibt sich aus der Differenz der idealen Reisezeit minus der tatsächlichen Reisezeit und bestimmt damit, wie viel länger sich ein Kraftfahrzeug im Kreisverkehr aufhält.

Die Reisezeit sowie die Staulänge, die sich im Kreisverkehr ergibt, unterliegen einem Bewertungssystem: den Qualitätsstufen (QSV). Das Bewertungssystem nach dem HBS teilt den Verkehrsablauf in Stufen von A - F ein. Dabei gelten die Stufen A - C als verkehrlich sehr gut zu bewerten, Stufe D ist in der Regel das angestrebte Ziel, dort entstehen Wartezeiten sowie Rückstau, der aber problemlos abfließt. Die Stufe D wird angestrebt, weil Stufe A - C meist auf eine leichte Fehldimensionierung des Vorhabens deuten könnte bzw. könnte diese verändert werden, sodass die QSV-Stufe D erreicht wird. Denn die Stufe D gewährleistet ebenfalls einen erfolgreichen Abfluss des Verkehrs. Die Stufen E und F hingegen beinhalten, dass der Verkehr nicht mehr richtig abfließen kann und die Kapazitätsgrenze erreicht bzw. überschritten ist. Auf dieses Bewertungssystem wurde in der folgenden Auswertung zurückgegriffen. Bei der Knotenauswertung wurde die Qualitätsstufe wie in Tabelle 3 eingeteilt.

Tabelle 3: Qualitätsstufen nach dem HBS für Regelungen durch Vorfahrtsbeschilderung

Qualitätsstufen						
QSV	A	B	C	D	E	F
Mittlere Verlustzeit [s]	≤10	≤20	≤30	≤45	≥50	/

Quelle: FGSV, Ausg. 2015g sowie eigene tabellarische Darstellung

Die QSV-Stufe F wird erst erreicht, wenn die Sättigungsverkehrsstärke größer als die Kapazität ist.

6.2 Übersicht der Szenarien

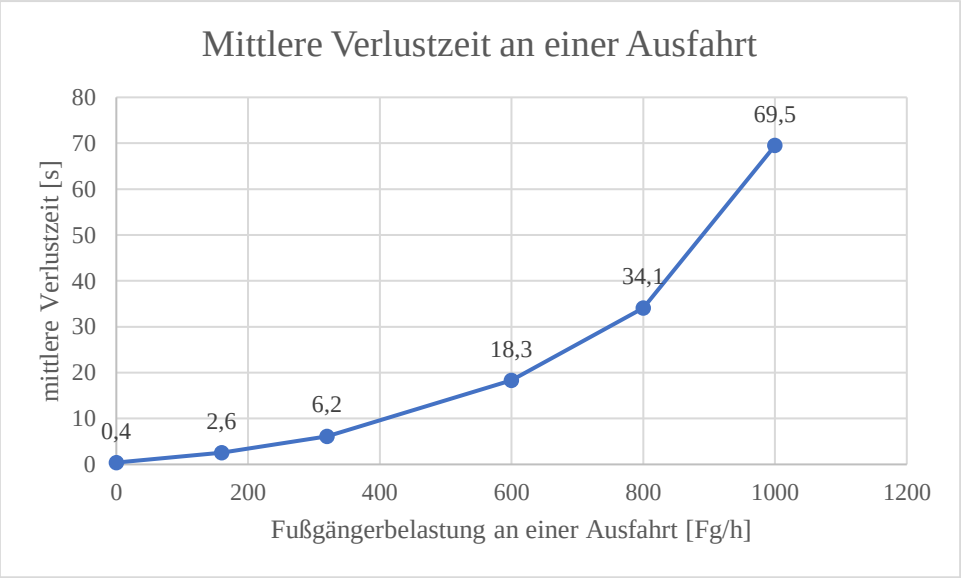
In dieser Arbeit wurden vier verschiedene Szenarien betrachtet und analysiert. Die ersten drei Szenarien befassen sich mit einer Fußgängerverteilung, die ungleichmäßig bzw. gleichmäßig auf die unterschiedlichen Ausfahrten verteilt wird. Im ersten Szenario wurde die Fußgängerbelastung an zwei Ausfahrten schrittweise erhöht und an zwei Ausfahrten konstant bei 80 Fg/h angesetzt. Im zweiten Szenario wurden die Fußgänger schrittweise an drei Ausfahrten erhöht und an einer konstant bei 80 Fg/h angesetzt. Im dritten Szenario wurden alle Ausfahrten durch eine schrittweise Erhöhung durch Fußgänger belastet. In jedem dieser Szenarien wurden drei Aspekte untersucht. Einerseits wurde eine Messung für eine Ausfahrt vorgenommen, die nur die mittlere Verlustzeit für den Abschnitt zwischen einer Zufahrt und einer Ausfahrt berücksichtigt (s. Abbildung 10, rote Markierung). Des Weiteren wurde die mittlere Verlustzeit für die Ausfahrt A1 betrachtet, bei der die Zuflüsse von Z1, Z2, Z3 und Z4 dort abfließen. Als dritter Analysewert wurden die mittleren Verlustzeiten des gesamten Kreisverkehrs betrachtet. Das Ziel dieser drei Szenarien war, herauszufinden wie sich der Kreisverkehr bei einer unterschiedlich starken Verteilung von Fußgängern auf den Ausfahrten verhält. Das lässt Rückschlüsse über die Leistungsfähigkeit der Kreisverkehrsausfahrten schließen.

Im vierten Szenario wurden sowohl die Fußgänger als auch das Kfz-Aufkommen kontinuierlich erhöht. Das Ziel des Szenarios war es zu analysieren, welchen Einfluss Fußgänger auf das Kfz-Aufkommen haben und ggf. eine These abzuleiten, bei welchem Kfz-Aufkommen wie viele Fußgänger eine Ausfahrt queren können, ohne dass Leistungsfähigkeitsdefizite entstehen bzw. bei welchem Fußgängeraufkommen an den Ausfahrten das Kfz-Aufkommen nicht weiter ansteigen darf.

6.3 Szenario 1: Ungleichmäßige Fußgängerverteilung - zwei Ausfahrten

In Szenario 1 wurde das Fußgängeraufkommen an den Ausfahrten A2 und A4 konstant bei 80 Fg/h angesetzt. An den Ausfahrten A1 und A3 wurde das Fußgängeraufkommen stetig im folgenden Rhythmus erhöht: 0 Fg/h, 80 Fg/h, 160 Fg/h, 240 Fg/h, 320 Fg/h, 400 Fg/h. Das Szenario soll einen besseren Überblick über die Auslastung des Kreisverkehrs verschaffen, wenn zwei Ausfahrten stark belastet sind, wie es beispielsweise am Hamburger Platz der Fall ist.

Abbildung 11: Mittlere Verlustzeit an einer Ausfahrt bei zwei belasteten Ausfahrten

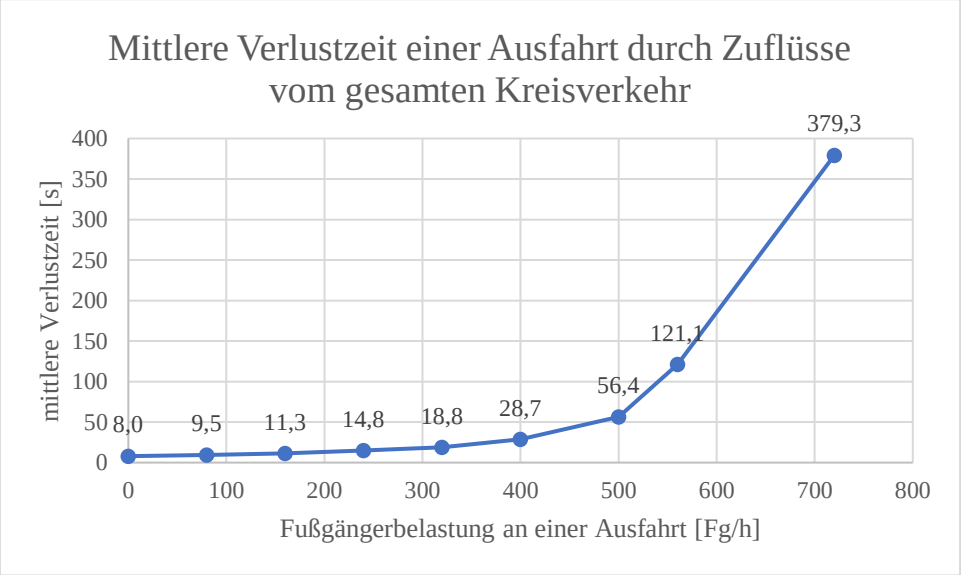


Quelle: Eigene Darstellung

Für eine genauere Betrachtung der Kapazität von Ausfahrten wurde die mittlere Verlustzeit einer einzelnen Ausfahrt gemessen in Abhängigkeit von zwei belasteten Ausfahrten (s. Abbildung 11). Der Messabschnitt fand wie in Abbildung 10 zwischen den rot gekennzeichneten Messabschnitten an einer der belasteten Ausfahrten statt.

Die Messung zeigt, dass bei einer einzelnen Betrachtung der Ausfahrt die Verlustzeit erst sehr spät ansteigt. Erst bei 400 Fg/h erreicht die Ausfahrt eine mittlere Verlustzeit von zehn Sekunden. Ab 400 Fg/h steigt die Verlustzeit drastisch an und erst bei ca. 620 Fg/h übersteigt die mittlere Verlustzeit 20 Sekunden. Bei ca. 900 Fg/h ist die QSV-Stufe D von 45 s überschritten. Das heißt, dass ab 45 s die Ausfahrt nicht mehr leistungsfähig genug ist, den sich dort bildenden Rückstau kontinuierlich abfließen zu lassen. Die Kapazität einer einzelnen Ausfahrt ist damit bei zwei belasteten Ausfahrten bei ca. 900 Fg/h an einer Ausfahrt und dem in Abbildung 10 gezeigten Kfz-Aufkommen erschöpft.

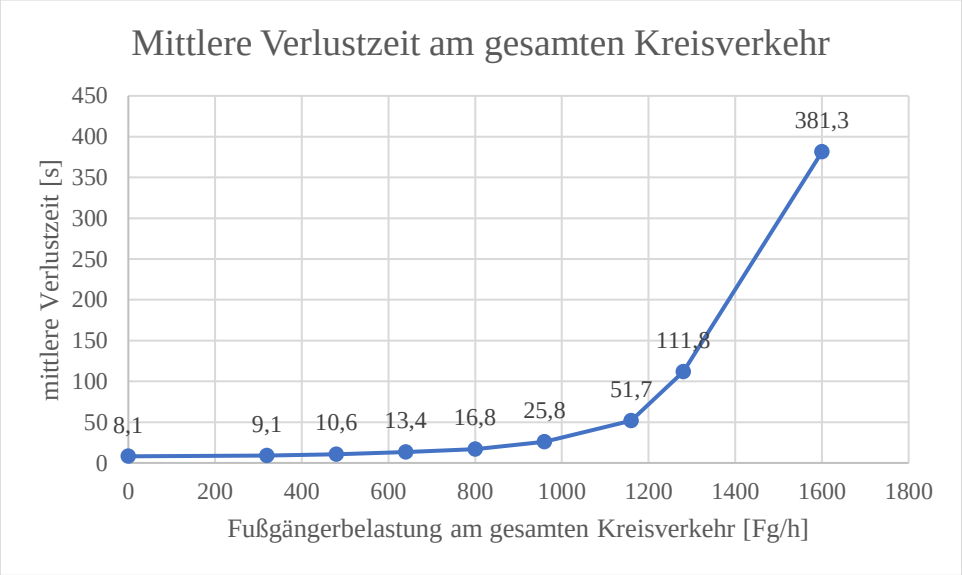
Abbildung 12: Mittlere Verlustzeit einer Ausfahrt durch Zuflüsse vom gesamten Kreisverkehr bei zwei belasteten Ausfahrten



Quelle: Eigene Darstellung

Zudem wurden Messungen zu der mittleren Verlustzeit einer Ausfahrt durchgeführt, in der nur die Zuflüsse von jeder Zufahrt berücksichtigt wurden und nur in die eine betrachtete Ausfahrt abflossen. (s. Abbildung 12). Das heißt, es wurde die Ausfahrt A1 betrachtet, mit den Zuflüssen von Z1, Z2, Z3 und Z4 und den dort entstandenen mittleren Verlustzeiten (s. Abbildung 10). Dabei ist zu erkennen, dass die Verlustzeit bis ca. 450 Fg/h an einer Ausfahrt nur sehr langsam steigt. Erst ab 500 Fg/h steigt der Wert drastisch an und deutet auf eine Zahl hin, die nicht mehr leistungsfähig ist. Bei ca. 490 Fg/h wird die QSV-Stufe D überschritten und die Leistungsfähigkeit ist nicht mehr gegeben. Der Anstieg erfolgt aber im Vergleich zu Abbildung 11 früher, denn die Verlustzeit ist bereits bei 500 Fg/h bei 56,4 s, während sie bei der Einzelmessung (s. Abbildung 11) erst bei 15 s ist. Es besteht demnach ein Unterschied, ob die Messung nur vor der Ausfahrt durchgeführt wird oder über den gesamten Knotenpunkt. Daraus lässt sich schließen, dass trotz der Einzelbetrachtung der Ausfahrt, weiterhin Verlustzeiten an den anderen Ausfahrten entstehen.

Abbildung 13: Mittlere Verlustzeit am gesamten Kreisverkehr bei zwei belasteten Ausfahrten



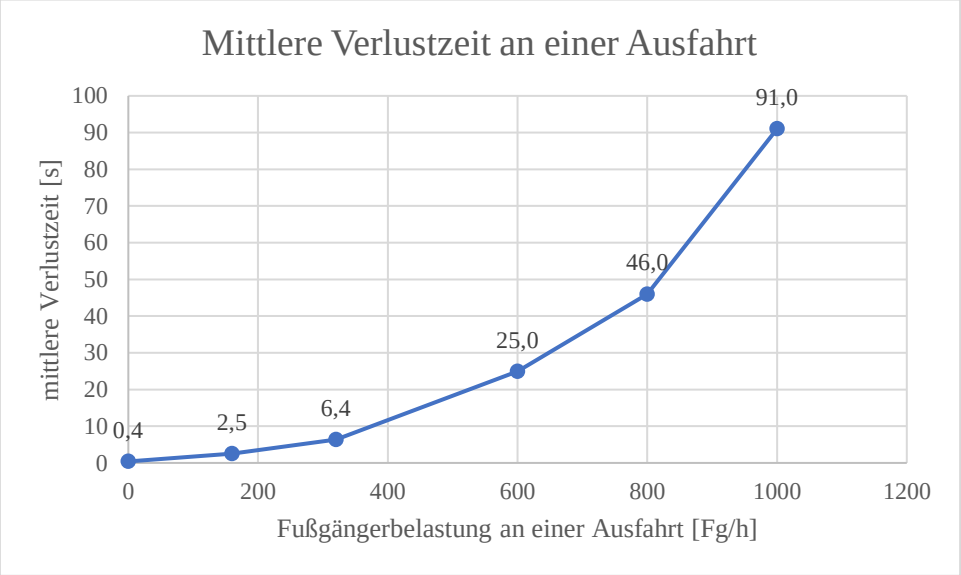
Quelle: Eigene Darstellung

Des Weiteren wurde die mittlere Verlustzeit für den gesamten Kreisverkehr an allen Ausfahrten simuliert. In Abbildung 13 ist zu erkennen, dass die Werte denen von Abbildung 12 ähneln. Die mittlere Verlustzeit ist stets etwas geringer als bei der Einzelbetrachtung einer Ausfahrt. Der Verlauf der Kurve ist aber ähnlich. Das lässt darauf schließen, dass bei einer ungleichmäßigen Fußgängerverteilung bei zwei belasteten Ausfahrten die mittlere Verlustzeit einer Ausfahrt bei Zuflüssen aus jeder Zufahrt ähnlich ist zu der eines Kreisverkehrs, bei dem alle Ausfahrten betrachtet werden. Da die Werte dennoch abweichen, scheint es dennoch unberücksichtigte Faktoren zu geben, die die Einzelbetrachtung nicht abdeckt. Die QSV-Stufe D von 45 s wird bei ca. 1050 Fg/h überschritten.

6.4 Szenario 2: Ungleichmäßige Fußgängerverteilung - drei Ausfahrten

In Szenario 2 wird das Fußgängeraufkommen auf drei Ausfahrten gleichmäßig verteilt. An der Ausfahrt A2 wurden konstant 80 Fg/h angesetzt Es besteht eine ungleichmäßige Fußgängerveteilung. An den Ausfahrten A1, A3 und A4 wird das Fußgängeraufkommen stetig im folgenden Rhythmus erhöht: 0 Fg/h, 80 Fg/h, 160 Fg/h, 240 Fg/h, 320 Fg/h, 400 Fg/h. Das Ziel dieses Szenarios ist es herauszufinden, wie viel Einfluss die Verteilung der Verkehrsmengen auf eine weitere Ausfahrt auf den gesamten Kreisverkehr hat.

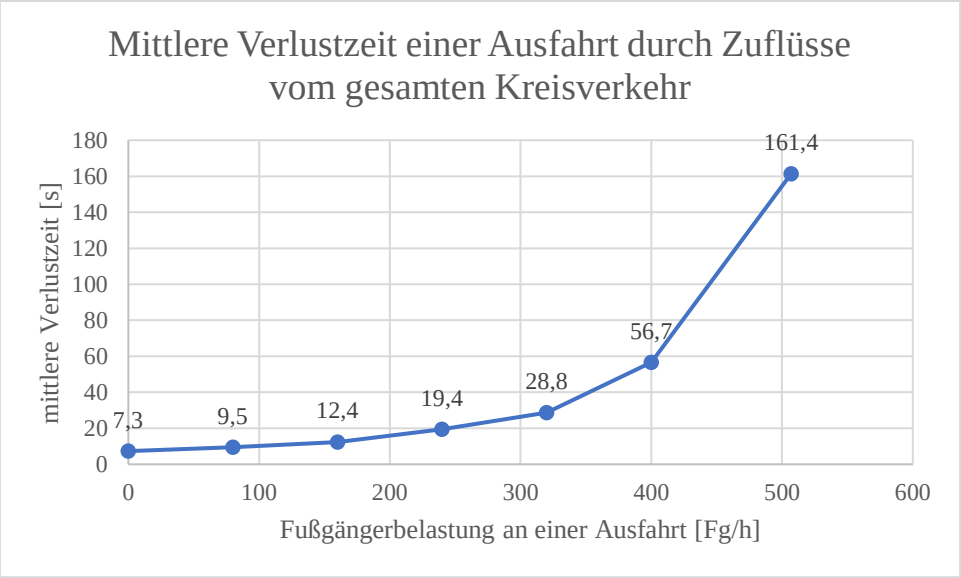
Abbildung 14: Mittlere Verlustzeit an einer Ausfahrt bei drei belasteten Ausfahrten



Quelle: Eigene Darstellung

Die Messung für Abbildung 14 erfolgte im gleichen Abschnitt wie für das Szenario 1. Auch hier ist zu erkennen, dass eine wirkliche Steigerung der mittleren Verlustzeit erst bei ca. 400 Fg/h bei der Betrachtung einer Ausfahrt anfängt. Obwohl die Messung nur den Bereich vor der Ausfahrt berücksichtigt, scheinen die Werte im Vergleich zu Szenario 1 geringfügiger zu steigen. Die QSV-Stufe D von 45 s wird bereits bei ca. 790 Fg/h überschritten und damit ca. 110 Fg/h früher als in Szenario 1 (s. Abbildung 11).

Abbildung 15: Mittlere Verlustzeit einer Ausfahrt durch Zuflüsse vom gesamten Kreisverkehr bei drei belasteten Ausfahrten

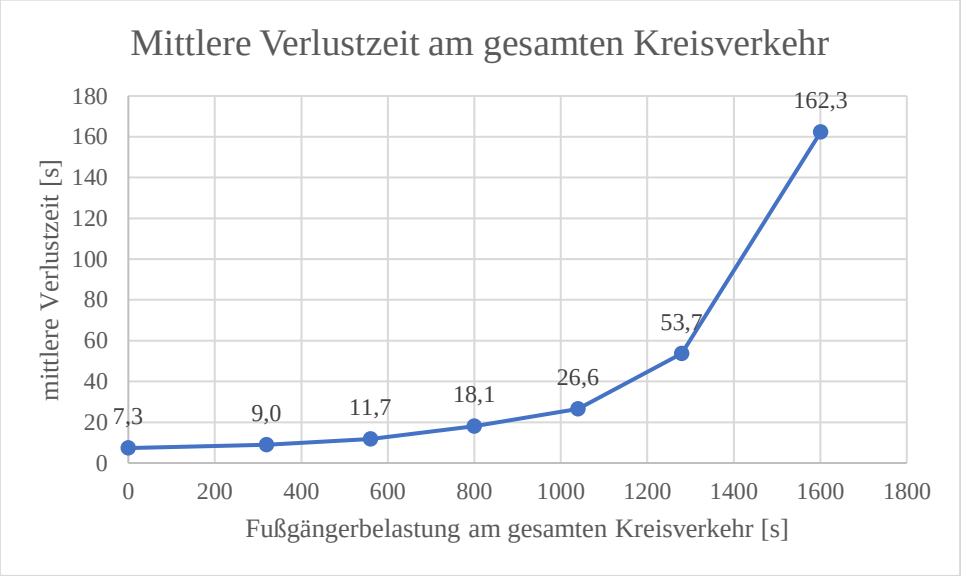


Quelle: Eigene Darstellung

Die mittlere Verlustzeit für die Betrachtung einer Ausfahrt in Abbildung 15 beginnt erst bei 320 Fg/h einer Ausfahrt stark zu steigen. Die QSV-Stufe D wird bereits bei ca. 360 Fg/h überschritten. Die mittlere Verlustzeit hat sich im Vergleich zu Szenario 1 mit

zwei belasteten Ausfahrten bei 400 Fg/h pro Ausfahrt mehr als verdoppelt und das bei einer zusätzlichen Ausfahrt. Auch wenn die Ausfahrt einzeln betrachtet wurde, scheint es auch in diesem Szenario so, dass die anderen Ausfahrten weiterhin einen Einfluss auf die mittlere Verlustzeit der betrachteten Ausfahrt haben.

Abbildung 16: Mittlere Verlustzeit am gesamten Kreisverkehr bei drei belasteten Ausfahrten



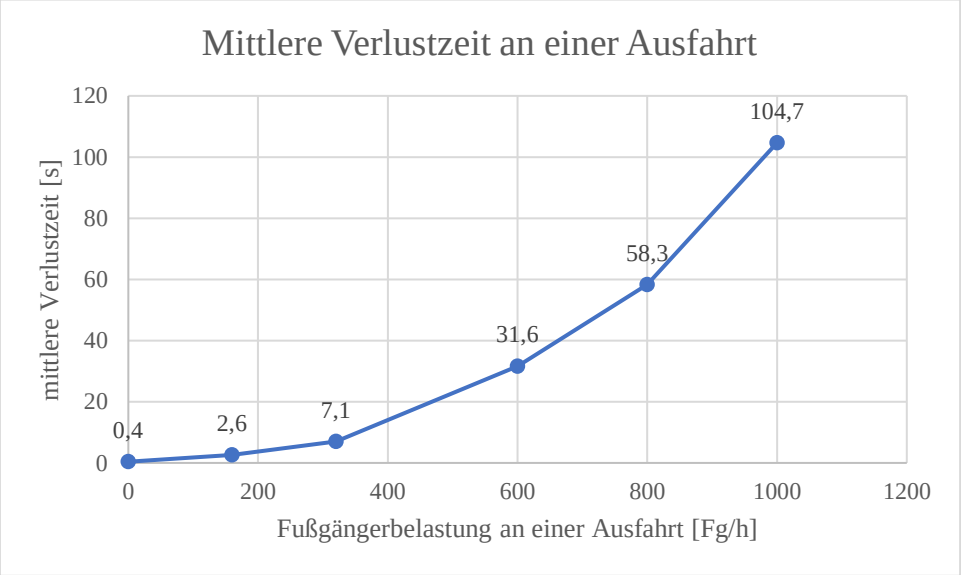
Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Betrachtung des gesamten Kreisverkehrs aus Abbildung 16 ist auch hier die mittlere Verlustzeit der von einer Ausfahrt - aber vier Zuflüssen - sehr ähnlich. Die Werte des gesamten Kreisverkehrs sind nur geringfügig niedriger. Es besteht demnach auch in diesem Szenario eine Auswirkung von den anderen Ausfahrten, selbst wenn nur die Zuflüsse in einer Ausfahrt betrachtet werden. Die QSV-Stufe von 45 s wird in der Betrachtung des gesamten Kreisverkehrs erst bei ca. 1250 Fg/h überschritten. Demnach 190 Fg/h später als in Abbildung 13.

6.5 Szenario 3: Gleichmäßige Fußgängerverteilung - vier Ausfahrten

In Szenario 3 wird an vier Ausfahrten das gleiche Fußgängeraufkommen angesetzt und schrittweise erhöht. Das Ziel des Szenarios soll es sein, einen Vergleich zu den ersten beiden Szenarien zu erhalten und zu analysieren, welche Auswirkungen vier Ausfahrten auf die mittlere Verlustzeit und demnach auf die Kapazität des Kreisverkehrs haben. In den folgenden Schritten wurde das Fußgängeraufkommen in der Simulation erhöht: 0 Fg/h, 80 Fg/h, 160 Fg/h, 240 Fg/h, 320 Fg/h, 400 Fg/h.

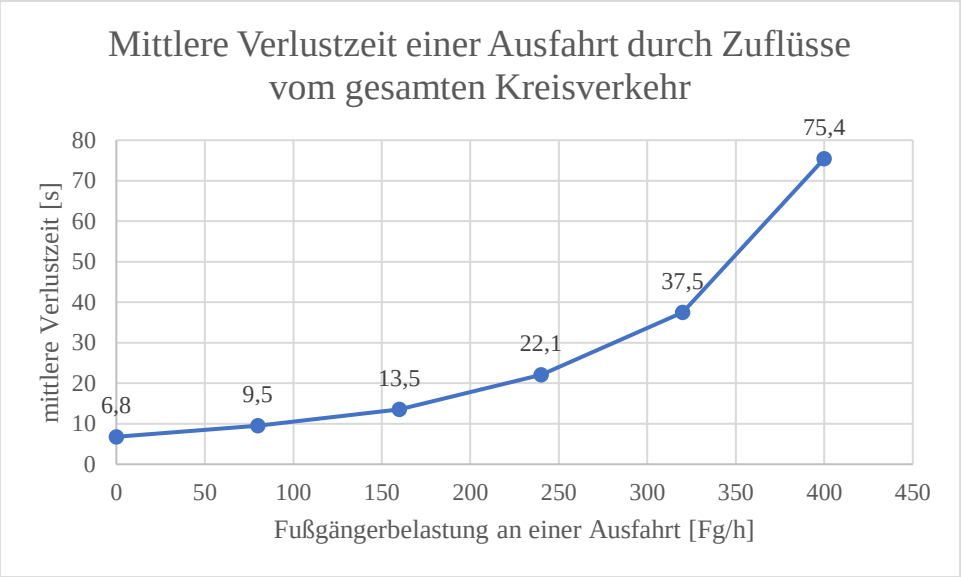
Abbildung 17: Mittlere Verlustzeit an einer Ausfahrt bei vier belasteten Ausfahrten



Quelle: Eigene Darstellung

Das Szenario mit vier belasteten Ausfahrten, wie in Abbildung 17 dargestellt, erfordert erst ein Fußgängeraufkommen von 320 Fg/h, bis diese einen wirklichen Einfluss auf die Ausfahrt haben. Doch bereits bei ca. 680 Fg/h wird die mittlere Verlustzeit von 45 s überschritten und entspricht damit nicht mehr der QSV-Stufe von D.

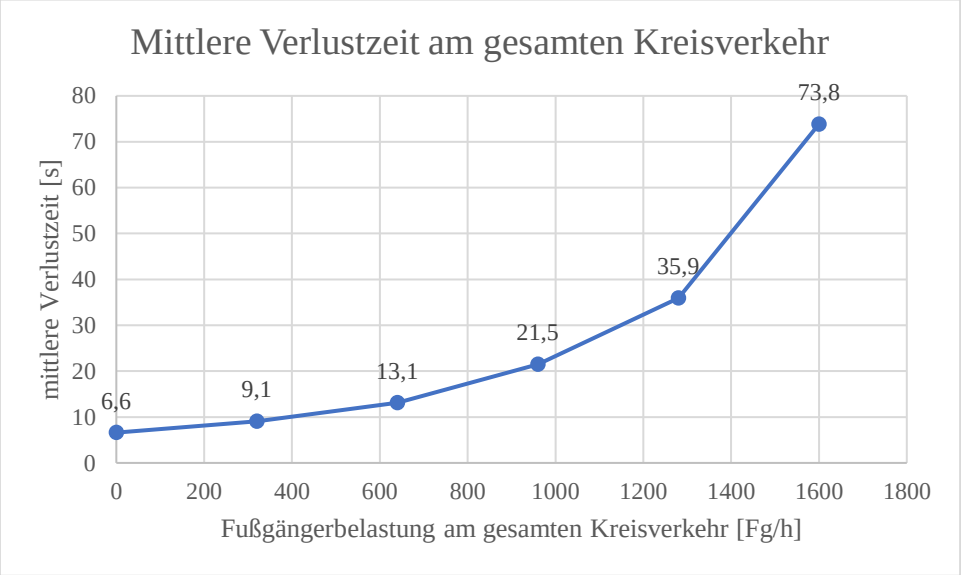
Abbildung 18: Mittlere Verlustzeit einer Ausfahrt durch Zuflüsse vom gesamten Kreisverkehr bei vier belasteten Ausfahrten



Quelle: Eigene Darstellung

Die mittlere Verlustzeit an einer Ausfahrt unter der Berücksichtigung aller Zuflüsse aus Abbildung 18 ist im Vergleich zu Szenario 2 und 3 erneut angestiegen. Bei 400 Fg/h liegt die Verlustzeit nun bei 75,4 s. Die Kapazität der Ausfahrt hat die QSV-Stufe D bereits bei ca. 330 Fg/h überschritten.

Abbildung 19: Mittlere Verlustzeit am gesamten Kreisverkehr bei vier belasteten Ausfahrten



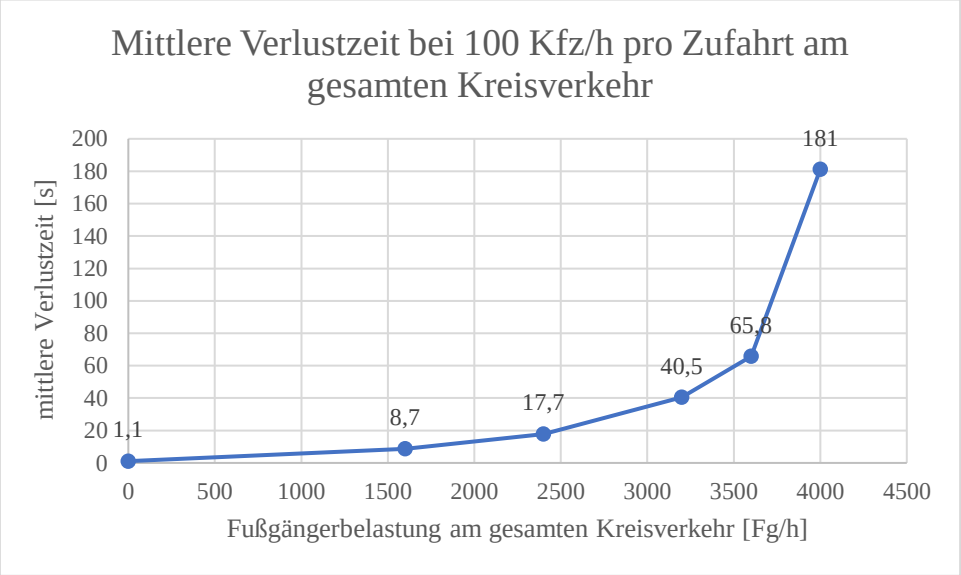
Quelle: Eigene Darstellung

Die mittlere Verlustzeit am gesamten Kreisverkehr aus Abbildung 19 unterscheidet sich erneut nur sehr gering von der aus der Betrachtung von einer Zufahrt aber allen Zuflüssen. Die Werte sind stets etwas niedriger. Bei der Betrachtung von allen Ausfahrten verursachen vermutlich noch weitere Faktoren Einflüsse auf den Kreisverkehr, die bei der Einzelbetrachtung nicht auftreten. Die mittlere Verlustzeit übersteigt die QSV-Stufe D von 45 s jedoch erst bei ca. 1360 Fg/h. Die QSV-Stufe D von 45 s wird demnach nochmal 130 Fg/h am gesamten Kreisverkehr später überschritten als in Szenario 2 mit drei belasteten Ausfahrten.

6.6 Szenario 4: Erhöhtes Verkehrsaufkommen von Fußgängern und Kfz

In Szenario 4 werden sowohl das Fußgängeraufkommen als auch das Verkehrsaufkommen vom Kfz-Verkehr schrittweise erhöht. Das Kfz-Aufkommen wird in den Schritten 100 Kfz/h, 200 Kfz/h, 300 Kfz/h und 400 Kfz/h pro Zufahrt erhöht und weicht damit von dem in Abschnitt 6.1 beschrieben Verkehrsaufkommen ab. Das Fußgängeraufkommen wird etwas unregelmäßiger angepasst, weil die maximale Auslastung bei unterschiedlichen Kfz-Belastungen zu verschiedenen Zeitpunkten eintritt. Das Ziel des Szenarios ist es, eine Verteilung herauszufinden, die einen Überblick darüber gibt, wann die mittlere Verlustzeit unter welcher Fußgängerbelastung einen Wert erreicht, der für das Kfz-Aufkommen und den gesamten Kreisverkehr die Leistungsfähigkeit beeinträchtigt und somit die Kapazität der Ausfahrt überschreitet.

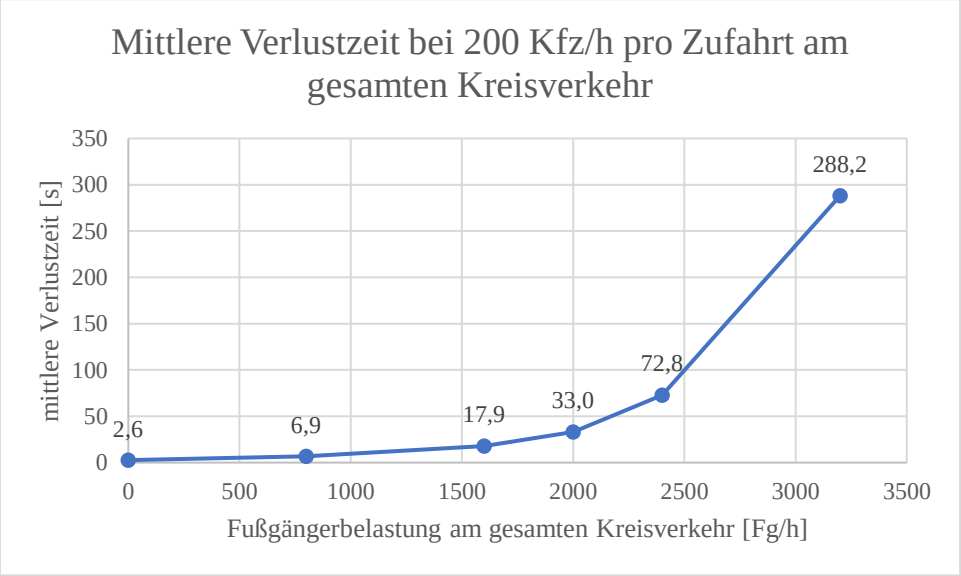
Abbildung 20: Mittlere Verlustzeit bei 100 Kfz/h pro Zufahrt am gesamten Kreisverkehr



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 20 zeigt die mittlere Verlustzeit in Abhängigkeit von Fußgängern bei 100 Kfz/h pro Zufahrt. Die mittlere Verlustzeit überschreitet die QSV-Stufe D von 45 s erst bei 3300 Fg/h. Das entspricht 825 Fg/h pro Ausfahrt.

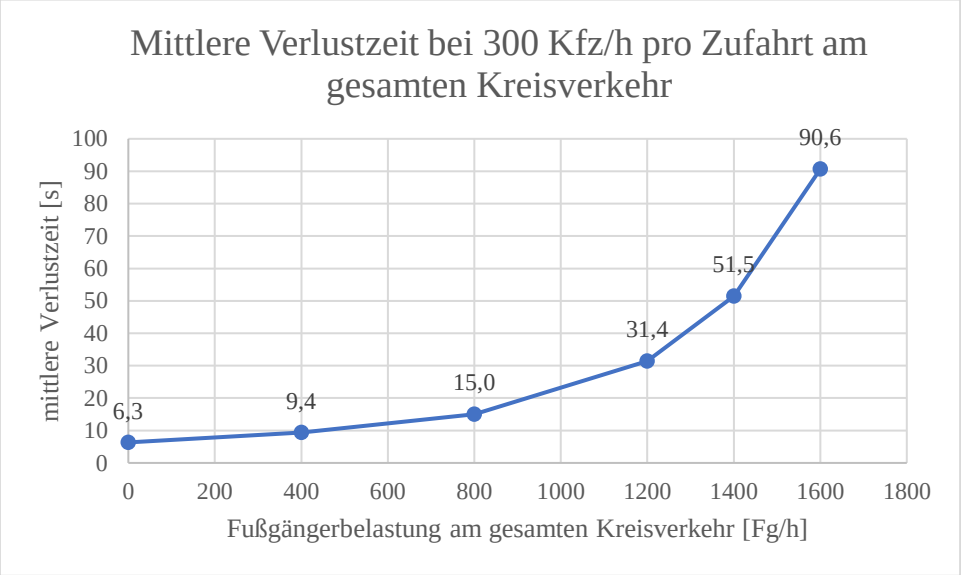
Abbildung 21: Mittlere Verlustzeit bei 200 Kfz/h pro Zufahrt am gesamten Kreisverkehr



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 21 hingegen überschreitet die 45 s der QSV-D der mittleren Wartezeit bereits bei ca. 2.100 Fg/h. Das entspricht 525 Fg/h pro Ausfahrt. Das heißt, eine Verdopplung von 100 Kfz/h auf 200 Kfz/h führt zwangsläufig dazu, dass das Fußgängeraufkommen niedriger sein muss, damit der Kreisverkehr in den Ausfahrten leistungsfähig bleibt. Das gleiche gilt auch umgekehrt. Soll ein Kreisverkehr geplant werden, in dem extreme Fußgängerbelastungen herrschen, darf das Kfz-Aufkommen nicht zu hoch sein.

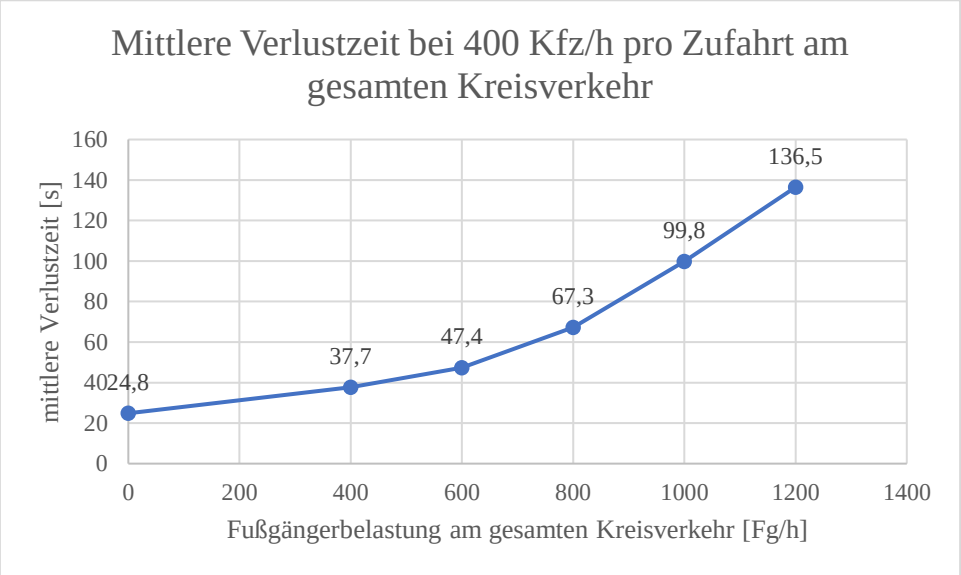
Abbildung 22: Mittlere Verlustzeit bei 300 Kfz/h pro Zufahrt am gesamten Kreisverkehr



Quelle: Eigene Darstellung

Bei einer Belastung von 300 Kfz/h pro Zufahrt, wie in Abbildung 22,ist das erste Mal eine signifikante Änderung zu Beginn der Simulationsergebnisse zu sehen. Selbst bei 0 Fg/h entsteht bereits eine mittlere Verlustzeit von 6,3 s am gesamten Kreisverkehr. Dementsprechend steigen die Werte auch fortlaufend schneller an. Die QSV-Stufe D von 45 s der mittleren Verlustzeit werden bereits bei ca. 1.320 Fg/h überschritten.

Abbildung 23: Mittlere Verlustzeit bei 400 Kfz/h pro Zufahrt am gesamten Kreisverkehr



Quelle: Eigene Darstellung

Bei einem Zufluss von 400 Kfz/h pro Ausfahrt, wie in Abbildung 23, ist vor allem auffällig, dass die Verlustzeit bereits bei 0 Fg/h bei 24,8 s liegt. Dennoch erfolgt ein drastischer Anstieg erst ab ca. 600 Fg/h am gesamten Kreisverkehr. Die QSV-Stufe D von 45 s wird kurz davor bei ca. 590 Fg/h überschritten. Sowohl bei 300 Kfz/h pro Zufahrt, als auch bei 400 Kfz/h, entstehen sogar Verlustzeiten, obwohl keine Fußgänger

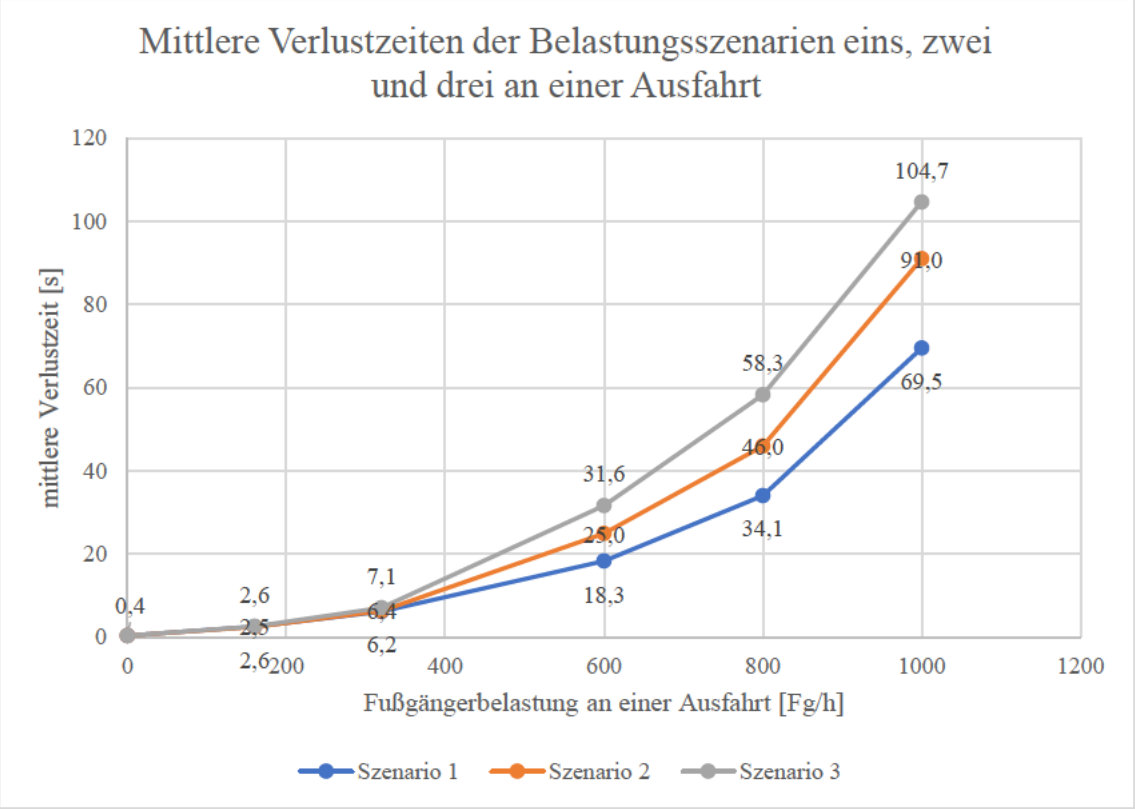
eine Ausfahrt queren. Das lässt vermuten, dass bei zu hohen Kfz-Belastungen die Verlustzeiten bereits an der Einfahrt des Kreisverkehrs entstehen, da die Kapazität der Kreisfahrbahn überschritten wird. Das heißt auch, dass bei zu hohen Kfz-Belastungen die Ausfahrten eine untergeordnete Rolle spielen, da schon in den Zufahrten bzw. der Kreisfahrbahn Kapazitätsgrenzen erreicht werden. In diesem Fall muss etwas am Aufbau des Kreisverkehrs verändert werden.

Der Kreisverkehr wurde ebenfalls für das Belastungsszenario von 500 Kfz pro Zufluss simuliert. Die erste Simulation hat bereits ergeben, dass die Kapazität der Kreisfahrbahn die Verkehrsmengen nicht fassen kann, da die Einfahrt in den Kreisverkehr nicht mehr möglich war und der Rückstau schon in den Zufahrten die Dimensionierung des Kreisverkehrs überstieg. Daraus lässt sich schließen, dass die Dimensionierung des Kreisverkehrs mit einstreifigen Zu- und Ausfahrten sowie der einstreifigen Kreisfahrbahn die Kapazitätsgrenze bei 500 Kfz/h pro Zufluss erreicht hat.

6.7 Kapazitätsgrenze und deren Auswirkung auf das System

Aus den simulierten Szenarien lässt sich grundsätzlich ableiten, dass der Kreisverkehr ein komplexes System ist, welches keinesfalls einzeln betrachtet werden kann. Bei einer gleichmäßigen Fußgängerverteilung reduziert jede zusätzliche Ausfahrt die Verlustzeiten des gesamten Kreisverkehrs. Gleichzeitig steigt die Kapazität jeder einzelnen Ausfahrt an. Stattdessen sollten Kreisverkehre als gesamtes System analysiert werden, denn sowohl der Aufbau als auch die Verkehrsteilnehmer haben einen Einfluss auf die Kapazität des Kreisverkehrs.

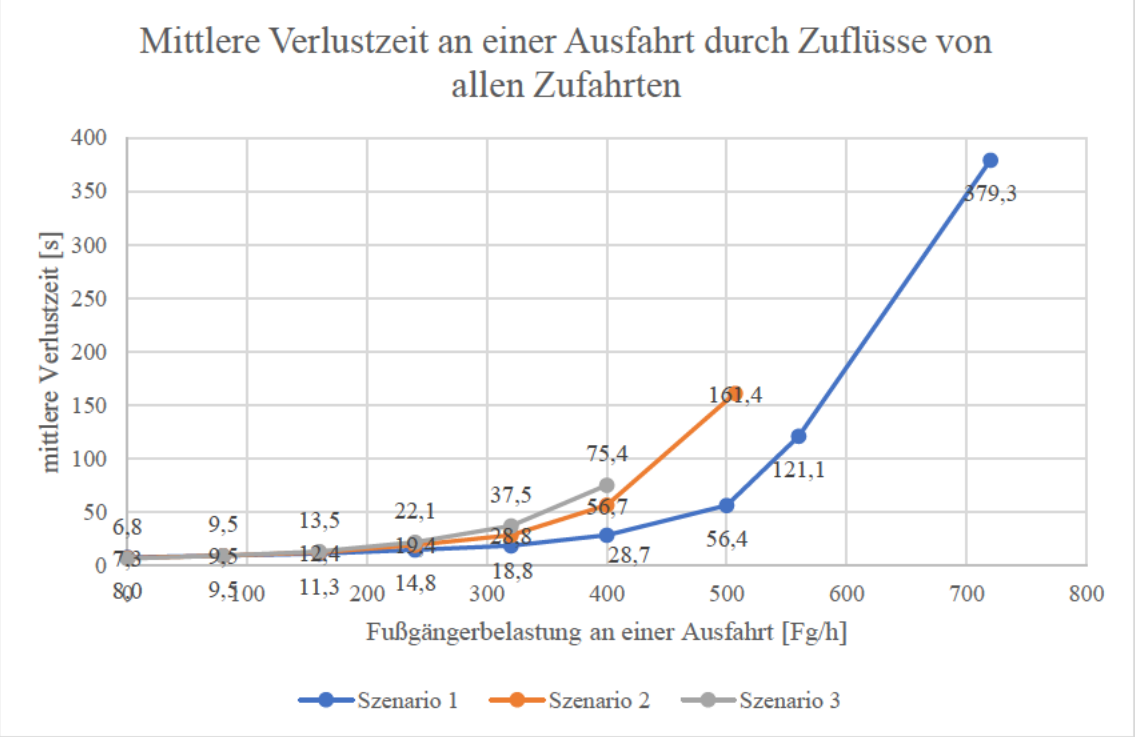
Abbildung 24: Mittlere Verlustzeit der Szenarien 1, 2 und 3 an einer Ausfahrt



Quelle: Eigene Darstellung

Die ersten drei Szenarien sind in Abbildung 24 zusammengefasst dargestellt und zeigen, dass, obwohl die Messung der mittleren Verlustzeit immer im gleichen Messbereich durchgeführt wurde, die Verlustzeit von zwei bis vier belasteten Ausfahrten bei gleicher Fußgängerbelastung stets zunimmt. Bei ca. 360 Fg/h beginnen auch die querenden Fußgänger an den anderen Ausfahrten, auch wenn diese nicht messtechnisch ermittelt wurden, eine Auswirkung auf die betrachtete Ausfahrt zu haben. Die Messwerte bis 360 Fg/h sind jedoch nahezu identisch und weisen darauf hin, dass bei niedrigen Fußgängerbelastungen an einer Kreisverkehrsausfahrt keine größeren Verlustzeiten entstehen und demnach auch keine Kapazitätsprobleme bestehen. Erst ab 360 Fg/h scheinen die Fußgänger eine erhebliche Wirkung auf die Ausfahrt sowie den gesamten Kreisverkehr zu haben. Ab diesem Wert ist es jedoch entscheidend, wie hoch die Belastung eines Kreisverkehrs durch Fußgänger am gesamten Kreisverkehr ist. Denn selbst bei der Betrachtung der einzelnen Ausfahrt haben die anderen Ausfahrten trotzdem einen Einfluss auf die mittlere Verlustzeit und damit auf die Kapazität der Ausfahrt. In Szenario 1 steigt die Verlustzeit deutlich langsamer, da zwei Ausfahrten weniger belastet sind und deswegen an diesen Ausfahrten keine Verlustzeiten entstehen. Szenario 3 hingegen besitzt vier belastete Ausfahrten und an jeder entstehen Verlustzeiten. Bei ca. 800 Fg/h ist der Anstieg der Werte jedoch nahezu identisch und lässt auf eine kontinuierliche Rückstaubildung schließen. Zwischen 700 - 1000 Fg/h kommen die Ausfahrten zum Stillstand. Indem sie die QSV-Stufe D von 45 s überschreiten.

Abbildung 25: Mittlere Verlustzeit einer Ausfahrt durch Zuflüsse von allen Zufahrten der Szenarien 1, 2 und 3

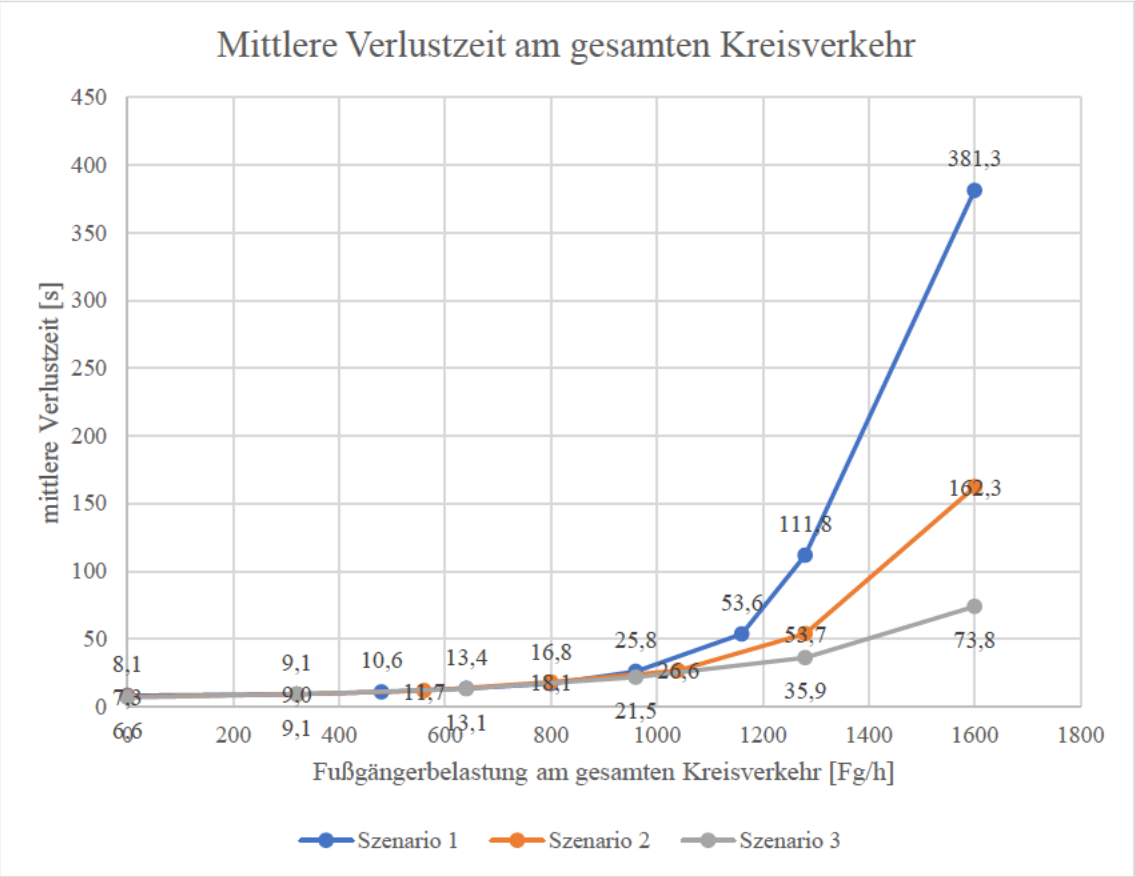


Quelle: Eigene Darstellung

Die Abbildung 25 zeigt die mittlere Verlustzeit, die entsteht, wenn eine Ausfahrt im Kontext des gesamten Kreisverkehrs betrachtet wird. Das heißt, es wird nur eine Ausfahrt betrachtet, die jedoch Verkehrsmengen aus jedem Zufluss erhält. Mögliche Verlustzeiten an den anderen Ausfahrten bestehen weiterhin. Auch bei diesen Simulationsergebnissen ist zu erkennen, dass der Anstieg der mittleren Verlustzeit sich bei ca. 240 Fg/h an einer Ausfahrt zu unterscheiden beginnt. In Szenario 1, wo zwei stark belastete Ausfahrten simuliert werden, steigt die mittlere Verlustzeit sehr viel später an und ist bei ca. 450 Fg/h bei der QSV-Stufe D von 45 s der mittleren Verlustzeit. Sobald sich die Belastung der Fußgänger - wie in Szenario 3 - auf eine weitere Ausfahrt verteilt, werden die 45 s bereits bei ca. 360 Fg/h überschritten. Bei vier gleichmäßig belasteten Ausfahrten durch Fußgänger werden die 45 s Verlustzeit bereits bei 330 Kfz/h überschritten und steigen auch deutlich langsamer an. Bei der Betrachtung einer Ausfahrt lässt sich also vermuten, dass die Verlustzeiten pro zusätzliche Ausfahrt schneller anwachsen. Dabei gilt es allerdings zu berücksichtigen, dass in Szenario 1 bei 400 Fg/h an einer Ausfahrt im gesamten Kreisverkehr nur 960 Fg/h die Ausfahrten queren, während in Szenario 2 bei 400 Fg/h an einer Ausfahrt im gesamten Kreisverkehr bereits 1.280 Fg/h Ausfahrten queren. In Szenario 3 sind es hingegen 1.600 Fg/h am gesamten Kreisverkehr. Das erklärt auch, weshalb die Verlustzeit aus Szenario 1 viel später ansteigt. In Szenario 1 sind bei der Betrachtung einer Ausfahrt bei 400 Fg/h nämlich deutlich weniger Fußgänger im gesamten Kreisverkehr vorhanden. Dementsprechend entstehen an jeder einzelnen

Ausfahrt geringere Verlustzeiten. In Abbildung 25 besitzt Szenario 1 bei 720 Fg/h die gleiche Fußgängeranzahl am gesamten Kreisverkehr wie Szenario 3 bei 400 Fg/h. In Szenario 3 ist die mittlere Verlustzeit jedoch bereits 1.600 Fg/h am gesamten Kreisverkehr bei 379,3 s. Daraus lässt sich ableiten, dass eine einzelne Ausfahrt in der Betrachtung nicht ausreicht. Die Faktoren des restlichen Kreisverkehrs haben einen zu großen Einfluss auf das System des Kreisverkehrs.

Abbildung 26: Mittlere Verlustzeit der Szenarien 1, 2 und 3 am gesamten Kreisverkehr



Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 26 ist die mittlere Verlustzeit des gesamten Kreisverkehrs aus den ersten drei Szenarien dargestellt. Dabei wurden die Verlustzeiten von jedem Zufluss zu jeder Ausfahrt gemessen. Dabei ist ein signifikanter Unterschied zu Abbildung 25 zu erkennen. Wird der Kreisverkehr im gesamten Kontext betrachtet, steigen die mittleren Verlustzeiten bei nur zwei hoch belasteten Ausfahrten sehr viel schneller an. Bereits bei ca. 960 Fg/h am gesamten Kreisverkehr trennen sich die unterschiedlichen Szenarien. Szenario 1 überschreitet die QSV-Stufe D von 45 s bereits bei ca. 1.050 Fg/h. Szenario 2 mit drei belasteten Ausfahrten überschreitet die 45 s erst bei ca. 1.250 Fg/h. Szenario 3 mit vier belasteten überschreitet die 45 s der QSV-Stufe D erst bei ca. 1.380 Fg/h (s. Tabelle 4).

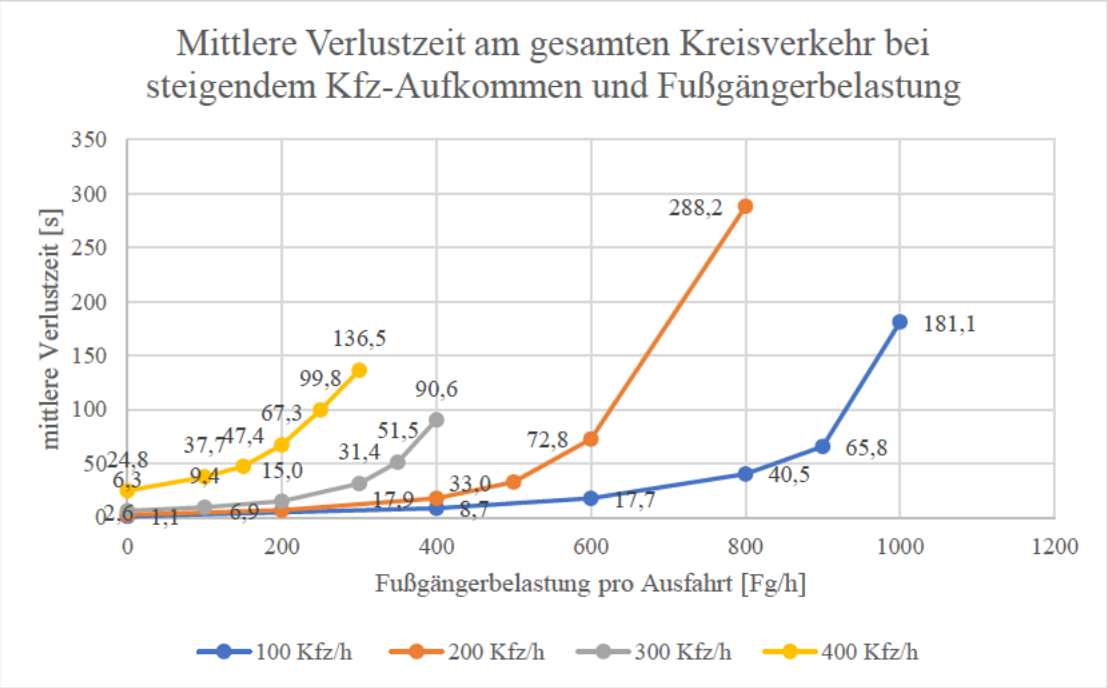
Tabelle 4: Überschreitung der QSV-Stufe D von Szenario 1,2 und 3 der Fußgänger am gesamten Kreisverkehr (Schriftgröße vereinheitlichen)

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Überschreitung der QSV-Stufe D [Fg am gesamten Kreisverkehr]	1.050	1.250	1.380

Quelle: Eigene Darstellung

Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass eine ungleichmäßige Verteilung bis zu einer Belastung von 960 Fg/h am gesamten Kreisverkehr eine eher untergeordnete Rolle spielt. Wird dieser Kennwert jedoch überschritten, gilt es die Verkehrs- und Fußgängerbelastungen genauer zu betrachten. Denn ab 960 Fg/h am gesamten Kreisverkehr scheint die Anzahl und deren gleichmäßige oder ungleichmäßige Verteilung der belasteten Ausfahrten in den Fokus zu treten und erhebliche Auswirkungen auf den Verkehrsfluss des Kreisverkehrs zu haben. Grundsätzlich gilt, dass eine gleichmäßige Verteilung von Fußgängern auf vier Ausfahrten die Verlustzeiten länger niedriger hält, als wenn an zwei oder drei Ausfahrten eine sehr hohe Fußgängerbelastung besteht.

Abbildung 27: Mittlere Verlustzeit bei simultaner Steigerung von Fußgängern und Kfz-Aufkommen am gesamten Kreisverkehr



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 27 stellt einen Überblick über die Auswirkungen von Fußgängern auf den Kfz-Verkehr dar. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass umso höher das Kfz-Aufkommen und die Fußgängerbelastung ist, desto schneller steigt die mittlere Verlustzeit und desto schneller ist der Kreisverkehr überlastet. Während bei 100 Kfz/h pro Zufluss die mittlere Verlustzeit erst bei ca. 600 Fg/h pro Ausfahrt wirklich auf die Fußgängermenge reagiert, hat sich die mittlere Verlustzeit bei 200 Kfz/h pro Zufluss bei einer Fußgängerbelastung

von ca. 500 Fg/h schon fast verdoppelt und steigt auch dementsprechend weiter schnell an. Bei 300 Kfz/h pro Zufluss werden schon ca. 360 Fg/h pro Ausfahrt als kritisch bewertet. Die Verlustzeit steigt so stark an, dass sie gerade noch die QSV-Stufe D von 45 s erreicht. Vereinfacht kann gesagt werden, dass pro 100 Kfz/h pro Zufluss zusätzlich, 200 Fg/h pro Ausfahrt weniger angesetzt werden können (s. Abbildung 27 und Tabelle 5), denn die Werte liegen sehr nah beieinander.

Tabelle 5: Mittlere Verlustzeiten in Abhängigkeit von Fußgängern und Kfz-Aufkommen

Kfz/h pro Zufluss	**100**	**200**	**300**	**400**
Fußgängerbelastung pro Ausfahrt	**600**	**400**	**200**	**0**
mittlere Verlustzeit [s]	17,7	17,9	15	24,8

Quelle: Eigene Darstellung

Des Weiteren zeigt die Abbildung 27, dass der Einfluss von Fußgängern umso stärker wird, je größer die Verkehrsstärke der Kraftfahrzeuge ist. Die Ausnahme bildet dabei die Zuflussmenge von 400 Kfz/h pro Zufahrt, denn diese besitzt schon bei 0 Fg/h pro Ausfahrt eine mittlere Verlustzeit von 24,8 s. Bei 150 Fg/h pro Ausfahrt ist die mittlere Verlustzeit bereits bei 45 s und überschreitet damit die QSV-Stufe D. Mehr Fußgänger pro Ausfahrt dürfen die Ausfahrten demnach nicht queren. Der Rückstau, der sich dort bildet, ist nicht mehr in der Lage ordentlich abzufließen.

Es wurde ebenfalls das Szenario für 500 Kfz/h pro Zufluss simuliert, die QSV-Stufe wurde jedoch bereits ohne Fußgängerbelastung überschritten. Das lässt darauf schließen, dass der Kreisverkehr bei viel zu hohen Kfz-Belastungen allein durch diese Belastungen die Kapazitätsgrenze überschreitet. Die Dimensionierung des Kreisverkehrs ist für diese Verkehrsmengen nicht mehr konzipiert. Unter diesen Bedingungen ist die Kapazität der Ausfahrten nicht mehr relevant, denn die Kapazität der Kreisfahrbahn reicht nicht mehr aus, um den Kfz-Verkehr einfahren zu lassen. Dementsprechend müssten Bypässe angelegt werden oder die Kreisfahrbahn sowie die Zu- und Ausfahrten zweistreifig erweitert werden.

7 Praxistaugliche Empfehlungen

Das Thema zu Kreisverkehrsausfahrten bleibt weiterhin eines, welches noch weiteren Forschungsbedarf benötigt. Das was in dieser Arbeit simuliert wurde, reicht keinesfalls aus, um das Thema in seiner gesamten Komplexität zu beleuchten. Dennoch lassen sich aus der Arbeit einige Rückschlüsse ziehen. Fußgänger haben einen großen Einfluss auf die Kapazität einer Kreisverkehrsausfahrt sowie den gesamten Kreisverkehr. Der Kreisverkehr ist ein komplexes System und dementsprechend auch abhängig von vielen Faktoren - er darf keinesfalls einzeln betrachtet werden. Die Betrachtung einzelner Ausfahrten kann Hinweise für den restlichen Kreisverkehr geben, sollte aber nicht als Referenz für eine Rechnung dienen, da zu viele Faktoren unberücksichtigt bleiben bzw. die Ergebnisse nicht korrekt wären. Sowohl Fußgänger als auch die Kraftfahrzeuge haben eine große Auswirkung auf den Kreisverkehr, denn diese arbeiten im Wechselspiel miteinander. Bei einer niedrigen Fußgängerbelastung und niedrigem Kfz-Aufkommen ist die Kapazität des Kreisverkehrs und die der Ausfahrten dementsprechend groß. Sofern jedoch beides ansteigt, verringert sich die Kapazität des Kreisverkehrs und die der Ausfahrten sehr schnell. Dabei spielen ebenfalls die Dimensionierung sowie die Verkehrsregeln des Kreisverkehrs eine Rolle. Bei einem einstreifigen Kreisverkehr mit einstreifigen Zufahrten ist die Einfahrt in den Kreisverkehr bei 400 Kfz/h pro Zufahrt bereits bei ca. 150 Fg/h pro Ausfahrt an der Kapazitätsgrenze. Bei Verkehrsmengen von 500 Fg/h ist die Kapazität der Kreisfahrbahn ausgereizt und die Einfahrt in die Kreisfahrbahn wird behindert. Für die Praxisumsetzung bleibt vorerst nur, einen einstreifigen Kreisverkehr über das HBS zu berechnen. Da dies jedoch keine Erkenntnisse über die Kapazität von Ausfahrten bringt, hilft in diesem Fall nur eine Simulation. Die Simulation kann je nach Aufgabenstellung die gewünschten Ergebnisse zeigen. Dabei können die Parameter realitätsnah bestimmt werden und es kann auf die Wünsche des Auftraggebers eingegangen werden. Weitere interessante Faktoren, die eine Simulation als vorteilhaft präsentieren, sind unter anderem Haltvorgänge pro Kfz, die Standzeit pro Kfz sowie die Staulänge bei Haltvorgängen, die analysiert werden können.

8 Schlussfolgerung

Im Zuge dieser Arbeit hat sich herausgestellt, wie unerforscht und vielseitig das Thema zu Kreisverkehrsausfahrten ist. Die Relevanz des Themas hat sich durch die Simulation sehr deutlich zu erkennen gegeben, denn Fußgänger an den Ausfahrten können den Kreisverkehr zur Leistungsgrenze zwingen. Die wichtigste Erkenntnis aus der Arbeit ist, dass eine Kreisverkehrsausfahrt keinesfalls allein betrachtet werden sollte. Jeder Fußgänger- sowie Kfz-Strom besitzt eine Auswirkung auf die Kapazität der Ausfahrten des gesamten Kreisverkehrs. Doch auch der Kfz-Verkehr selber ist maßgebend. Hohe Kfz-Belastungen werden stärker durch Fußgänger beeinflusst als niedrige. Zudem kann ein hohes Kfz-Aufkommen einen einstreifigen Kreisverkehr bei ca. 500 Kfz/h pro Zufahrt von sich aus zur Überlastung führen - ohne die Einwirkung von Fußgängern. Demnach ist eine wichtige Erkenntnis, dass die Kapazität der Kreisfahrbahn einen wichtigen Faktor in der Kapazitätsberechnung für die Ausfahrten darstellt, denn diese muss ausreichend sein, damit die Kapazität an den Ausfahrten überhaupt einen übergeordneten Faktor spielt. Letztendlich muss zu der Kapazität von Kreisverkehrsausfahrten noch weitere Forschung betrieben werden, damit in der Zukunft eine Berechnungsformel aufgestellt werden kann.

9 Literaturverzeichnis

ADAC. (2005). *Der Kreisverkehr.* München: ADAC.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (2012a). *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen: RASt 06.* Köln: FGSV-Verl.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (2013b). *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen RAL.* Köln: FGVS-Verl.

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

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (Ausg. 2006d). *Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren.* Köln: FGSV.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (Ausg. 2012e). *Empfehlungen für Verkehrserhebungen: EVE.* Köln: FGSV-Verl.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (Ausg. 2015f). *Arbeitspapier Turbokreisverkehre.* Köln: FGSV-Verl.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (Ausg. 2015g). *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: HBS 2015. Teil S: Stadtstraßen.* Köln: FGSV-Verl.

Graevemeyer, D. (2018). *Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Anschlusses des Mindener Krankenhauses im Zuge der Verlängerung derOrtsumgehung Minden.* Salzgitter.

Hubberten, C., Schlaich, J., & Friedrich, M. (2009). *Einfluss von Fußgängern auf kleine einstreifige Kreisverkehrsplätze, Straßenverkehrstechnik, Heft 11.* Bonn: Kirschbaum Verlag.

National Research Council (U.S.). (2000). *Highway capacity manual.* Washington, D.C: Transportation Research Board, National Research Council.

Siegloch, W. (1973). *Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalstuerung.*

US Department of Transportation. (2000). *Roundabouts: An Informational Guide.* Springfield: National Technical Information Service.

Verkehrslenkung Berlin. (2014). *Verkehrsstärkenkarte DTV Werktag Kfz in 1000 [24h].* Berlin: Verkehrslenkung Berlin.

Wiedmann, U. (1993). *Transporttechnik der Fussgänger, Schriftenreihe IVT Nr. 90.* Zürich.

10 Abkürzungsverzeichnis

FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
HBS	Handbuch für die Bemessung von Stadtstraßen
DTV	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
VLB	Verkehrslenkung Berlin
LOS	Level of Service
QSV	Qualitätsstufe
HCM	Highway Capacity Manual
USA	United States of America
Fg/h	Fußgänger pro Stunde
Fg/s	Fußgänger pro Sekunde
Fg/min	Fußgänger pro Minute
Fg	Fußgänger
Kfz	Kraftfahrzeug
Kfz/h	Kraftfahrzeuge pro Stunde