



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Masterarbeit

Thema:

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

Vorgelegt von Mohamed Nouri Hachicha

Fakultätsinterner Betreuer: Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux

Zweitprüfer: Basma Khelfa

Wuppertal, den 11.09.2020

Diese Arbeit wurde vorgelegt am Fachgebiet für Verkehrssicherheit und
Zuverlässigkeit

Bergische Universität Wuppertal Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux

Eidesstattliche Versicherung

Erklärung zur selbständigen Erstellung der Arbeit

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit einschließlich aller beigefügter Materialien selbstständig und ohne Benutzung anderer, als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Werken entnommen sind, sind in jedem Einzelfall unter Angabe der Quelle deutlich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.



Wuppertal, den 11.08.2020

Unterschrift



Inhalt

Formelzeichen	III
Abkürzungen.....	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
1. Einleitung.....	1
1.1 Zielsetzung.....	2
1.2 Gliederung der Arbeit.....	3
2. Stand der Technik.....	4
2.1 Grundlagen der Verkehrsflusstheorie	4
2.1.1 Verkehr.....	4
2.1.2 Verkehrsablauf.....	5
2.1.3 Verkehrsfluss.....	5
2.1.4 Geschwindigkeit.....	6
2.1.5 Verkehrsdichte.....	7
2.1.6 Fahrzeugzustand	8
2.1.7 Verkehrsnachfrage.....	10
2.1.8 Fundamentaldiagramm	10
2.2 Analyse des Verkehrsüberlastungsbereiches	12
2.2.1 Definition der Verkehrsüberlastung.....	12
2.2.2 Definition der Stau	12
2.2.3 Ursachen des Staus.....	12
3. Verkehr Simulation Software.....	14
3.1 Definition der Simulation	14
3.2 Definition der Verkehrssimulation	14
3.3 Verkehrsflussmodelle.....	16
3.3.1 Arten von Verkehrsmodellen	16
3.3.1.1 Makroskopische Modelle	16
3.3.1.2 Mikroskopische Modelle	18
3.3.1.3 Mesoskopische Modelle	18
3.3.2 Kreuzungsmodelle	19
3.3.2.1 First In First out.....	20
3.3.2.2 Yield-To-Right (YTR) Model	21
3.4 Verkehrssimulationsprogramm	21
3.4.1 SUMO.....	22
3.4.2 MATSim.....	23

3.4.3	AIMSUM.....	23
3.4.4	VISSIM.....	24
3.4.5	CORSIM.....	25
3.4.6	Vor- und Nachteile von SUMO.....	26
3.4.7	Vor- und Nachteile von MAtSim.....	27
3.4.8	Vor- und Nachteil von Aimsun.....	28
3.4.9	Vor- und Nachteile von VISSIM.....	29
4.	Die Einführung von SUMO.....	31
4.1	Fahrzeuge und Linien.....	33
4.2	Simulation.....	34
4.3	Implementierung von SUMO.....	34
4.3.1	Kreuzung Robert-Daum-Platz.....	34
4.3.2	Openstreetmap.....	36
4.4	Definition des Kreisverkehrs.....	37
4.4.1	Vorteile eines Kreisverkehrs.....	37
4.4.2	Nachteile eines Kreisverkehrs.....	38
4.5	Definition einer Lichtsignalanlage.....	38
4.5.1	Vorteile und Nachteile einer Lichtsignalanlage.....	39
5.	Szenario, Simulation und Analyse.....	40
5.1	Beschreibung der Szenarios.....	40
5.1.1	Szenario 1 (1-Spur mit Ampel).....	41
5.1.2	Ergebnisse des ersten Szenarios:.....	43
5.1.3	Szenario 2 (Kreisverkehr mit Ampel).....	43
5.1.4	Ergebnisse des zweiten Szenarios.....	46
5.2	Ermittlung einer Allgemeinen Kreuzung.....	47
5.2.1	Implantierung des Szenarios 3.....	48
5.2.2	Ergebnisse des dritten Szenarios.....	49
6.	Fazit & Ausblick.....	52
7.	Quellenverzeichnis.....	54
8.	Literaturverzeichnis.....	56
9.	Anhang.....	58
9.1	Anhang 1.....	58
9.2	Anhang 2.....	61
9.3	Anhang 3.....	62
9.4	Anhang 4.....	66
9.5	Anhang 5:.....	69

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
Q	Kfz/h	Verkehrsfluss
n	Kfz	Anzahl der Fahrzeuge
Δt	h (Stunden)	Zeitraum
V	Km/h	Geschwindigkeit
D	Kfz/Km	Verkehrsdichte
X	Km	Streckenabschnitt
Δx_b	Km	Mittelwert der Bruttoweglücken
Δx_n	Km	Mittelwert der Nettoweglücken
L_f	m	Länge des Fahrzeugs
Δt_b	S	Mittelwert der Bruttozeitlücken
Δt_n	S	Mittelwert der Nettozeitlücken
C	Kfz/h	Kapazität
q	%	Anteil der grünen Phasen
P	%	Anteil der Fahrzeuge im Kreisverkehr
α	Kfz/h	Kapazität in Ankunft
$\beta(i)$	Kfz/h	Kapazität in Angebot
φ	Kfz/h	Verkehrsstärke in Ankunft
w	Kfz/h	Verkehrsstärke in Angebot
F	Kfz/h	Fluss auf jede Strecke im SUMO

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
ADAC	Allgemeine Deutsche Automobil-Club
AIMSUN	Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks
CorSim	Core Simulation
d.h	das heißt
D-V-Diagramm	Dichte- Geschwindigkeit-Diagramm
FIFO	First-In-First-Out
Kfz	Kraftfahrzeug
LKW	Lastkraftwagen
LPOE	Land Port of Entry
LSA	Lichtsignalanlage
LWR-Modell	Lighthill and Whitham- oder Richards- Modell
Matsim	Multi- Agent Transport Simulation
OSM	OpenStreetMap
PKW	Personenkraftwagen
PTV	Planung Transport Verkehr
Q-D-Diagramm	Verkehrsfluss-Dichte-Diagramm
Q-V-Diagramm	Verkehrsfluss- Geschwindigkeit-Diagramm
SUMO	Simulation of urban mobility
Usw	Und so weiter
VISSIM	Verkehr in Städten – Simulation
VBA	Visual Basic for Applications
XML	extensible Markup Language
YTR	Yield to Right

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Netto- und Bruttoabstand (Zeitlücke und Weglücke).....	8
Abbildung 2: Fundamentaldiagramm (Berger, 2012).....	11
Abbildung 3: Hauptursache von Stau [7].....	13
Abbildung 4: Ereignisbasierte (oben) und zeitschrittorientierte (unten).....	15
Abbildung 5: Die verkehrstechnischen Flussmodelle [8].....	16
Abbildung 6: verschiedene Simulationsmodelle im Verkehr [8]	19
Abbildung 7: Kreuzungsdiagramm mit Hervorhebung der Fahrwege für die Fahrspur in Richtung Osten	20
Abbildung 8: FIFO-Kreuzungsflussmodell [11]	21
Abbildung 9: Prozessablauf in MATSim [12]	23
Abbildung 10: Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann [18].....	25
Abbildung 11: Beispiele für abstrakte Straßennetze, wie sie mit "Netgenerieren"; von links nach rechts: Gitter ("Manhattan", Spinne und zufällig Netzwerk)[10].....	31
Abbildung 12: Gemeinsames Netzwerkvorbereitungsverfahren für die Netzgenerierung und die Netzumwandlung	33
Abbildung 13: Robert-Daum -Platz (Google Earth).....	35
Abbildung 14: Beschreibung der Robert-Daum-Platz (Google Earth).....	35
Abbildung 15: Robert-Daum-Platz mit Openstreetmap [23].....	36
Abbildung 16: Verkehrssimulation der Robert-Daum- Platz.....	37
Abbildung 17: Konfliktpunkte einer Kreuzung [25]	38
Abbildung 18: Skizze einer Lichtsignalanlage (Krimmling, 2017).....	39
Abbildung 19: Darstellung Szenario 1	40
Abbildung 20:Skizzierung mit Sumo -1-Spur mit Ampel-	42
Abbildung 21: Verkehrsfluss pro 1 Stunde in Abhängigkeit vom Zeitraum der Ampel q.....	43
Abbildung 22: Einsatzbereiche der Kreisverkehre (Außerdurchmesser/Kapazität) [28]	44
Abbildung 23: Verkehrsverhalten in Szenario 2.....	45
Abbildung 24: Skizzierung mit Sumo (1Spur-Kreisverkehr)	45
Abbildung 25: Hauptmakroskopische Variable einer Kreuzung	47
Abbildung 26: Verkehrsverhalten in Szenario 3.....	48
Abbildung 27: Vergleich der Ergebnisse J1-FIFO mit SUMO	49
Abbildung 28: Vergleich der Ergebnisse J2 FIFO mit SUMO.....	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von SUMO	27
Tabelle 2: Vor- und Nachteile von MATSim.....	28
Tabelle 3: Vor- und Nachteil von Aimsun	29
Tabelle 4: Vor- und Nachteile von VISSIM	30
Tabelle 5: Parameter des ersten Szenarios	42
Tabelle 6: Ergebnisse des Szenarios 2	46
Tabelle 7: Ergebnisse der FIFO und SUMO.....	50
Tabelle 8: Ergebnisse der Szenario 1	61
Tabelle 9: Ergebnisse der Szenario 2	62
Tabelle 10: Ergebnisse der Szenario 3	66
Tabelle 11: Ergebnisse der SUMO und FIFO.....	69

1. Einleitung

Das individuelle Verhalten der Verkehrsteilnehmer*innen wird heutzutage ständig durch neue Entwicklungen und Veränderungen beeinflusst. Die heutigen Forschungsarbeiten beschäftigen sich daher mit der Beschreibung der aktuellen Verkehrsflüsse und der Verkehrsströme auf dem hochrangigen Straßennetz, d.h. der Verlauf des Fundamentaldiagramms, die Einteilung in verschiedene Verkehrszustände und die Leistungsfähigkeit werden seit Jahrzehnten untersucht und kontinuierlich durch neue Erkenntnisse und Theorien erweitert. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Verkehrsforscher*innen umfassen oft auch die Auswertung realer Verkehrsdaten. Sie werden jedoch durch die Zufälligkeit des Verkehrs und die der vorherrschenden Randbedingungen bedingt.

Das Verständnis der charakteristischen Verkehrsparameter und ihrer Abhängigkeiten ist die Voraussetzung für die korrekte Interpretation der Ergebnisse. Neue Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Optimierung des Verkehrsflusses und die Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen. Das Verkehrsaufkommen sollte mit hoher Verkehrssicherheit und ausreichender Qualität des Verkehrsflusses bewältigt werden können. Die Entwicklung des Verkehrssystems und sogar der Verkehrsmittel kann die Menschen zum Reisen ermutigen, d.h. sie können eine größere Entfernung vom Arbeitsplatz und vom Stadtzentrum akzeptieren, damit geht eine Erhöhung der Reisezeit für die Verkehrsteilnehmer*innen einher und führt zu höheren Versemissionen und Volkswirtschaftskosten. Motorisierte Verkehrsteilnehmer*innen werden nun für viele deutsche Großstädte zu einem Problem. Es wird klar, dass die Zahlen der Verkehrsteilnehmer*innen steigen und die Kapazität des Straßennetzes in den Stadtzentren nur selten erhöht werden können. Die Zunahme des Verkehrs steht demnach im Zusammenhang mit der wachsenden Einwohnerzahl in den Ballungszentren [1]. Z.B. in der Stadt Wuppertal hat die Anzahl der Einwohner von 361000 Bewohnern in Jahr 2019 auf 362.400 Bewohner am Anfang 2020 zugenommen. Damit wurde die Anzahl der angemeldeten Autos um 17000 Autos zwischen 2009 und 2018 gesteigert [2].

Der zunehmende Motorisierungsgrad und die daraus resultierende Verkehrszunahme hat zu einer ständigen Erweiterung des Straßennetzes geführt. Aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen können die Verkehrsprobleme heute nicht allein mit baulichen Maßnahmen gelöst werden. Um den Verkehrsfluss zu optimieren, wurden in den letzten Jahren betriebliche Maßnahmen ergriffen, um "Staus aus dem Nichts" entgegenzuwirken, indem auf stark befahrenen Straßenabschnitten Verkehrsbeeinflussungsanlagen installiert wurden.

Im Jahr 2018 wurden auf deutschen Autobahnen fast 2.000 Staus pro Tag verzeichnet, was rund 745.000 Staus im ganzen Jahr bedeutet [3]. Nicht nur die Leistungsfähigkeiten des Verkehrssystems werden dadurch belastet, sondern auch die Umwelt der Innerstadt werden durch Lärm,

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal
Treibhausgase und Schadstoffe belastet. Drei Viertel der deutschen Bevölkerungen fühlen sich von Straßenverkehrslärm gestört oder belästigt [4].

Der Mobilität bedarfsgerecht zu werden in Bezug auf die Lebens- und Umweltqualität in den Städten sowie die integrierte Stadtentwicklungs- und Verkehrspolitik der Straßennetze wird daher in jedem Fall angestrebt. Die Stadterweiterung und der Zuwachs der Menschen in der Stadt fordern eine immer bessere Leistungsfähigkeit der Verkehrssysteme für die Bevölkerungen. Die Verkehrsflüsse im Straßenverkehr werden durch sowohl die Staus versucht zu minimieren oder diese effektiv aufzulösen als auch deren Effizienz in ökologischer und zeitlicher Sicht zu verbessern. Es stellt dabei die Optimierung der Verkehrssysteme durch die Reduzierung oder Verlagerung des innerstädtischen Verkehrs dar.

Das Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit an der Bergischen Universität Wuppertal beschäftigt sich mit diesem Thema. In der vorliegenden Masterarbeit wird die Untersuchung des Verkehrsablaufs am hochrangigen Straßennetz in Wuppertal unter der Berücksichtigung von den charakteristischen Kenngrößen vorgenommen. Es wird ein Überblick über die Eigenschaften des Verkehrsflusses gegeben und eine Datenanalyse mit bereitgestellten Einzelfahrzeugdaten von mehreren Messquerschnitten durchgeführt. Die Ergebnisse sollen neue Erkenntnisse über den aktuellen Verkehrsablauf schaffen und können somit in einer weiteren Betrachtung mit themenverwandten Forschungsarbeiten optimiert werden.

1.1 Zielsetzung

Ziel dieser Masterarbeit ist es, eine Optimierung des Verkehrsflusses sowie der Verkehrsnetze eines bestimmten Kreisteils in Wuppertal mit dem Programm SUMO zu erreichen, um die Probleme von Stau, stockendem Verkehr und Verschwendung der Zeit zu vermeiden oder diese zumindest zu minimieren und diese Effektiv aufzulösen. Es findet somit die Darstellung anhand der Wissenschaft, Literatur und Artikel, sowie die Beschreibung der täglichen Probleme und Ursachen allgemein der größeren Städte statt. Das wesentliche Ziel liegt in der Analyse und Auswertung der verschiedenen Verkehrsflussmodelle sowie der Vergleich der unterschiedlichen Verkehrssoftware. Außerdem wird die Ableitung des Anforderungsprofils vom IST-Zustand in Wuppertal untersucht. Zunächst wird ein Kreisteil der Stadt Wuppertal fokussiert, wobei eine Simulation mit dem Programm SUMO eingeführt wird. Darüber hinaus werden alle Ausgaben ermittelt, die während der Validierung und Bewertung durchgeführt werden. Hierdurch entsteht ein Optimierungsbedarf in Bezug auf die Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze des Kreisteils der Stadt Wuppertal.

1.2 Gliederung der Arbeit

Die Bearbeitung der dargelegten Ziele erfolgt in vier Schritten. Zunächst werden in Kapitel Zwei die Grundlagen des Verkehrsablaufs in Form einer Literaturrecherche behandelt. Die Ausarbeitung beginnt mit der Einteilung, Messung und Erklärung der charakteristischen Verkehrskenngrößen. Besondere Beachtung erfahren dabei die Erkenntnisse zur stochastischen Definition der Kapazität, die Analysen des Überlastungsbereiches und die Identifikation und Definition von Stau.

Kapitel Drei beschäftigt sich mit den verkehrstechnischen Grundlagen, die für die Simulation relevant sind. Es wird die Definition des Begriffes der Simulation, Verkehrssimulation und verschiedene Verkehrsflussmodelle behandelt. Außerdem wird die Einteilung und Auswertung der verschiedenen existierenden Simulationsprogramme sowie die Untersuchung deren Stärken und Einschränkungen beschrieben.

Nach der Auswertung der Simulationsprogramme wird das Programm Sumo entscheiden. Kapitel Vier beinhaltet eine Beschreibung der Einführung des Programms Sumo und die Anwendung an der Stadt Wuppertal an der Kreuzung Robert-Daum-Platz. Daher wird ein Vergleich zwischen den verschiedenen Verkehrsnetzen (Kreuzung- Kreisverkehr) durchgeführt.

Anschließend beschäftigt sich das Kapitel 5 mit einer Umsetzung der mikroskopischen bis zur makroskopischen Perspektive von der Kreuzung bis zu dem Netzwerk. Die Leistungsfähigkeit des erstellten Programmsystems wird in Form verschiedener Szenarios von Netzwerken überprüft. Dabei werden sowohl die Modellierung, die Parametereinrichtung, als auch die Sequentielle und die Simulation beschrieben. Zudem wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse gegeben. Abschließend entsteht ein Ausblick auf mögliche zukünftige Einsatzgebiete sowie die Optimierung der Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze.

2. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Forschung zu den hier einzelnen untergeordneten Themen Verkehrsfluss, Verkehrsüberlastungsbereiche und Verkehrsablauf beschrieben. Die Ausführungen sollen einen Überblick über Verkehrsflusstheorie geben.

2.1 Grundlagen der Verkehrsflusstheorie

Innerhalb eines theoretischen Rahmens werden die wesentliche Literatur und Theorien zu dem Thema Verkehr vorgestellt sowie die Schlüsselkonzepte erläutert. Darauf folgend werden auf die Begriffe Verkehr und Verkehrsfluss und deren wichtigsten Beziehungen ausführlicher eingegangen.

2.1.1 Verkehr

Verkehr ist definiert als jede "technische, organisatorische und wirtschaftliche Maßnahme, die als Voraussetzung für die Ortsveränderung von Personen, Gütern, Energie oder Nachrichten dient. (Mathias Bertram, 2013). Darunter ist jede Form der Bewegung zwischen mehreren Punkten des täglichen Lebens zu verstehen. Es müssen die folgenden Bewegungsvorgänge wie (Beschleunigung, Fahren, Bremsen ...) durchgeführt werden, damit die Definition des Verkehrs vollzogen wird.

Im Bereich des Straßenverkehrs gibt es zwei große Typen von Verkehr. Der erste Typ wird als öffentlicher Verkehr bezeichnet. Hierzu werden all jene Verkehrsmittel gezählt, die nicht Einzelpersonen gehören, sondern einer Gruppe von Personen zugeordnet sind, wie Busse, Züge, Straßenbahnen... Andererseits gibt es den individuellen Verkehr wie LKW, PKW, Fahrräder - diese sind als private Verkehrsteilnehmer zu verstehen und nicht gemeinschaftlich. Beide sind im Alltag im Verkehr aktiv. Diese Interaktion zwischen mehreren Fahrzeugen wird als Verkehrsfluss bezeichnet und kann mit messbaren und geeigneten Kenngrößen gemessen werden. Entweder können sie als einzelne Fahrzeuge (mikroskopisch) oder als Fahrzeugkollektive mit bestimmtem Zeitraum und Abschnitten (makroskopisch) beschrieben werden (Moltenbrey, 2020).

2.1.2 Verkehrsablauf

Verkehrsablauf wird als eine Zusammenfassung der gesamten zeitlichen und räumlichen Verarbeitung von Verkehrs- und Bewegungsvorgängen in den Bereichen des Straßenverkehrs, wie Fahren, Beschleunigen, Bremsen, Anhalten, Warten, Überholen, Anfahren und Anhalten usw., verstanden. Darüber hinaus wird dieser durch drei Eigenschaften gekennzeichnet:

- **Individualität:** Die Elemente des Straßenverkehrs sind nicht völlig verkehrsfrei oder zeitlichen Zwängen unterworfen. Verkehrsteilnehmer*innen in einzelnen Fahrzeugen weisen immer individuelle Verhaltensmuster auf.
- **Kollektivität:** Unter dieser Eigenschaft kann die Gesamtheit der Bewegungsvorgänge mit mathematischen und stochastischen Methoden beschrieben werden. Der Verkehrsfluss ist durch eine große Anzahl von Einzelfahrzeugen gekennzeichnet, was ihm den "Charakter einer Massenerscheinung" verleiht.
- **Komplexität:** Der Verkehrsfluss ist durch zahlreiche Parameter (z.B. Straße, Fahrzeug, Fahrer*in) charakterisiert, "die eng miteinander interagieren". Daher hat jegliche Änderung eines einzelnen Parameters eine direkte oder indirekte Auswirkung auf den Verkehrsfluss. Die Positionen der Fahrzeuge sind durch die individuelle Wahl der Geschwindigkeit, räumlich und zeitlich, im Straßenverkehr nicht identisch. Dies führt zu unterschiedlichen Ergebnissen bei rein räumlicher bzw. rein zeitlicher Betrachtung die zur Folge „bedeutsame Bewertungsgrößen des Verkehrsablaufs" haben (e.V., 2001).

2.1.3 Verkehrsfluss

Unter dem Begriff Verkehrsfluss „Q“ versteht man die Bewegung der einzelnen Fahrzeugeinheiten (Dieter Lohse, 2011). Es bedeutet, dass die Anzahl „n“ der Fahrzeuge einen bestimmten Straßenabschnitt pro Zeiteinheit bezeichnet. Aus der mathematischen Vorgabe ergibt sich die folgende Formel (2-1):

$$Q(t_1, t_2) = \frac{n(t_1, t_2)}{\Delta T} \quad (2-1)$$

Q (t1 , t2) : Verkehrsstärke (Fluss)

n (t1 , t2) : Anzahl der Fahrzeuge

ΔT : bestimmter Straßenabschnitt pro Zeiteinheit

Der Begriff Verkehrsfluss hängt von der Ausnutzung der Verkehrswege durch den fahrenden Verkehr ab. Z.B kann die Zunahme der höheren Geschwindigkeiten des Verkehrsflusses eine entsprechende Beeinträchtigung durch Geschwindigkeitsunterschiede prägen.

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

Im Straßenverkehr versteht man unter diesem Begriff die Ausnutzung der Verkehrswege durch den fahrenden Verkehr, d.h. bei höheren Geschwindigkeiten des Verkehrsflusses nimmt dieser vorerst einmal zu, kann aber durch entsprechende Beeinträchtigungen wie gegenseitige Behinderungen durch größere Geschwindigkeitsunterschiede wieder abnehmen. Folgende Verkehrsflüsse sind zu betrachten:

- **Freier Verkehr (stationärer Zustand):** Unter dem Begriff „Freier Verkehr“ versteht man die Freiheit, dass die Fahrer*innen freie Auswahl bei der Geschwindigkeit oder Überholmanövern aufgrund von Straßen- und Fahrzeugbedingung haben. Es bedeutet, dass keine Behinderung durch andere Verkehrsteilnehmer*innen vorhanden ist.
- **Teilgebundener Verkehrsfluss (metastabiler Zustand):** Darunter versteht man den teilweise eingeschränkten Verkehrsfluss. Es bezeichnet eine wesentliche gegenseitige Behinderung durch das hohe Verkehrsaufkommen und die Abnahme der durchschnittlichen Geschwindigkeit des Verkehrsflusses, weil die Möglichkeit des freien Überholens und die Wahl der Geschwindigkeit für alle Verkehrsteilnehmer*innen eingeschränkt ist.
- **Verbundener Verkehrsfluss (instabiler Zustand):** Verbundener Verkehrsfluss umfasst blockierten Verkehr (niedrige Geschwindigkeit, extrem schwankend mit hohem Verkehrsaufkommen), überlasteten Verkehr (niedrige Geschwindigkeit und sehr niedriges Verkehrsaufkommen) und stationären Verkehr (Geschwindigkeit und Verkehrsaufkommen nahe Null). Je höher die Verkehrsdichte ist, desto geringer die Durchschnittsgeschwindigkeit und das Verkehrsaufkommen.

2.1.4 Geschwindigkeit

Der Begriff Geschwindigkeit bezieht sich auf eine Ortsänderung (zurückgelegte Entfernung) pro Zeitintervall. Die Einheit ist „Entfernung / Zeiteinheit“ Z.B m/s oder Km/h. Geschwindigkeiten können sowohl lokal als auch momentan bestimmt werden und haben somit einen zeitlichen oder räumlichen Bezug [5]. Der Unterschied besteht in der Art der Messung:

a) Lokale Geschwindigkeit

Die lokale Geschwindigkeit wird auf einem festen Streckenabschnitt für eine bestimmte Zeitdauer ermittelt. Die lokale Durchschnittsgeschwindigkeit ergibt sich als arithmetisches Mittel der Geschwindigkeit einzelner Fahrzeuge. Die lokale mittlere Geschwindigkeit ist abhängig von der Anzahl der Fahrzeuge „n“, für die Anzahl der gemessenen Werte gilt die folgende Gleichung (2-2):

$$V(l) = \frac{1}{n} \sum_1^n V_l(i) \quad (2-2)$$

n : Anzahl der Messwerte (Anzahl der Fahrzeug)

V_l(i) : lokale Geschwindigkeit eines Fahrzeugs i

b) **Momentane Geschwindigkeit**

Auf der anderen Seite der Geschwindigkeit gibt es die Berücksichtigung der durchschnittlichen Momentangeschwindigkeit "V(m)". die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge, die sich zu einem festgelegten Zeitpunkt innerhalb eines bestimmten Streckenabschnitts befinden. Dies hängt auch von der Anzahl der gemessenen Werte ab und wird durch die folgende Gleichung (2-3) ermittelt:

$$V(m) = \frac{1}{n} \sum_1^n V_m(i) \quad (2-3)$$

n = Anzahl der Messwerte (Anzahl der Fahrzeuge)

V_m(i) = momentane Geschwindigkeit des Fahrzeugs

2.1.5 **Verkehrsdichte**

Unter dem Begriff Verkehrsdichte versteht man ein Parameter „D“ in der Verkehrsplanung, der zur Beurteilung der Qualität, Leistung und Sicherheit eines Verkehrsflusses herangezogen werden kann. Er definiert die Anzahl der Fahrzeuge je Wegeinheit zu einem Zeitpunkt. Darüber hinaus kann dieser Parameter aus einer momentanen Messung bestimmt und kann als eine momentane Kenngröße (2-4) dargestellt werden (Kesting, 2010).

$$D = \frac{n}{x} \quad (2-4)$$

D: Verkehrsdichte [z.B. Kfz/km]

n : Anzahl der Fahrzeuge

x : Streckenabschnitt [Km]

Häufig schätzt man die Verkehrsdichte „ρ(x, t)“ mit der "hydrodynamischen" Formel (2-5) ab. Sie wird aus Verkehrsflüssen und mittlerer momentaner Geschwindigkeit abgeleitet. Die Verkehrsdichte lässt sich auch mit den Kenngrößen aus einer lokalen Messung durch das Einsetzen in die Zustandsgleichung bestimmen.

$$D(x, t) = \frac{Q(x,t)}{V(x,t)} \quad (2-5)$$

$D(x,t)$: Verkehrsdichte

$Q(x,t)$: Verkehrsstärke

$V(x,t)$: mittlere momentane Geschwindigkeit

2.1.6 Fahrzeugzustand

Der Abstand zwischen zwei Fahrzeugen kann entweder den Bruttoabstand oder Nettoabstand bezeichnen. Der von der Vorderkante zu Vorderkante gemessene Abstand zweier Fahrzeuge wird als Bruttoabstand bezeichnet. Der Nettoabstand wird von der Hinterkante des vorausfahrenden bis zur Vorderkante des nachfolgenden Fahrzeugs gemessen (Abbildung 1). Zudem wird der Abstand zwischen Räumlichem (Weglücke) und Zeitlichem (Zeitlücke) unterschieden.

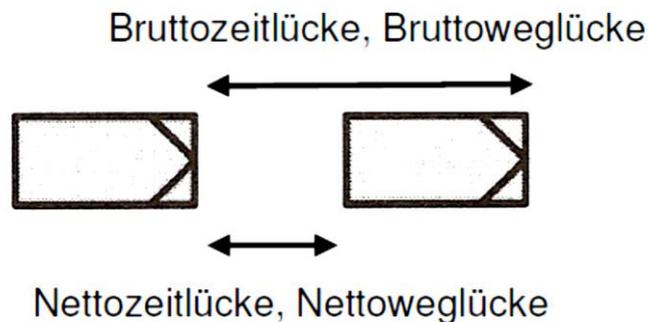


Abbildung 1: Netto- und Bruttoabstand (Zeitlücke und Weglücke)

- **Weglücke:** Die Abstandslücke wird als räumlicher Abstand zwischen Fahrzeugen verstanden und beschreibt den Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen zu einem bestimmten Zeitpunkt. Es handelt sich um eine momentane Kenngröße. Die mittlere Bruttoabstandsdifferenz ist der Kehrwert der makroskopischen Kenngröße der Verkehrsdichte und wird nach folgender Gleichung berechnet (Formel 2-6):

$$\Delta X_b = \frac{x}{n} \quad (2-6)$$

ΔX_b : Mittelwert der Bruttoweglücken [m]

x : Streckenabschnitt (m)

n : Anzahl der Fahrzeuge

Wenn die Fahrzeuglänge nicht bekannt ist wird die Nettoweglücke mittels der Belegungszeit des Detektors errechnet und nach folgender Gleichung (2-7) bestimmt:

$$\Delta X_n = \Delta X_b - L_{fz} \quad (2-7)$$

ΔX_n : Nettoweglücke

ΔX_b : Bruttoweglücke

L_{fz} : Fahrzeuglänge

- **Zeitlücke:** Unter der Zeitlücke versteht man eine Beschreibung des zeitlichen Fahrzeugabstands zwischen dem Passieren eines Querschnitts durch aufeinanderfolgende Fahrzeuge. Es handelt sich um eine lokale Kenngröße. Zeitlicher Abstand von Bug zu Bug zweier hintereinanderfahrender Fahrzeuge wird als Bruttozeitlücke bezeichnet. Der Mittelwert der Bruttozeitlücken eines Verkehrsstroms ist der Kehrwert der Verkehrsstärke.

$$\Delta T_b = \frac{t}{n} \quad (2-8)$$

ΔT_b : Mittelwert der Bruttozeitlücken [z.B. s]

T : Zeitintervall

n : Anzahl der Fahrzeuge

Außerdem ist zeitlicher Abstand vom Heck des vorderen Fahrzeuges bis zum Bug des nachfolgenden Fahrzeuges eine Nettozeitlücke. Die mittlere wird aus dem Kehrwert der makroskopischen Kenngröße der Verkehrsstärke bestimmt und nach der folgenden Gleichung (2-9) berechnet:

$$\Delta T_n = \Delta T_b - \frac{L_{fz}}{Q} \quad (2-9)$$

ΔT_n : Mittelwert der Nettozeitlücken [z.B. s]

ΔT_b : Mittelwert der Bruttozeitlücken [z.B. s]

L_{fz} : Länge des Fahrzeugs

Q : Verkehrsstärke

2.2.7 Kapazität

Die Kapazität „C“ entspricht der maximalen Verkehrsstärke „Qmax“, die auf einer bestimmten Weg- und den Verkehrsbedingungen auf einem bestimmten Querschnitt erreicht werden kann (2-10).

$$C = Q_{max} \quad (2-10)$$

C : Kapazität [z.B. Kfz/h]

Q_{max} : Maximale Verkehrsstärke

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

Sie hängt von den äußeren Bedingungen (z.B. Wetter) und dem Verhalten der Verkehrsteilnehmer*innen ab. Aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens der Menschen, das von Ort zu Ort unterschiedlich ist, und aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens zu verschiedenen Zeiten, bleibt seine Bestimmung unsicher und kann nicht einheitlich ermittelt werden. Voraussetzung für die Annäherung der Kapazität ist, dass auf der Ebene des betrachteten Querschnitts eine Verkehrsüberlastung auftritt. Die Geschwindigkeit oder Qualität des Verkehrs wird nicht berücksichtigt. In Deutschland wird in der Regel eine Stunde als Zeiteinheit für die Verkehrsintensität gewählt.

2.1.7 Verkehrsnachfrage

Unter Verkehrsnachfrage versteht man eine Definition der Stärke des Verkehrs, der in einer Zeiteinheit am Anfang des betrachteten Straßenabschnitts ankommt. Sie ist immer geringer als die Kapazität und kann das angeforderte Verkehrsvolumen ohne Verzögerung abführen. Wenn jedoch die Verkehrsnachfrage die Kapazität übersteigt, wird der ausgehende Verkehr auf die Kapazität begrenzt und es kommt zu einer zeitlichen und möglicherweise auch räumlichen Verlagerung des Verkehrs. Zählraten von permanenten Zählstationen, die zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage verwendet werden. Im Falle eines Staus entspricht die Verkehrsstärke jedoch nicht der Verkehrsnachfrage, sondern es wird der aktuelle Stauabfluss gemessen. In diesem Fall können Schätzmethoden zur Modellierung der Verkehrsnachfrage verwendet werden (Kirchhoff, 2002).

2.1.8 Fundamentaldiagramm

Das Fundamentaldiagramm ist eine dreidimensionale Punktwolke, die mittels Projektion in drei zweidimensionalen Diagrammen dargestellt werden kann. Diese graphische Darstellung umfasst die Zusammenhänge der drei Kenngrößen Verkehrsstärke „Q“, Verkehrsdichte „D“ und mittlere momentane Geschwindigkeit „V“. Es dient zur Möglichkeit der vielfachen Aussagen über die Charakteristik des Verkehrsflusses an einem Querschnitt. Die drei Diagramme sind:

- Verkehrsstärke–Verkehrsdichte–Diagramm (Q-D-Diagramm)
- Verkehrsstärke–Geschwindigkeit–Diagramm (Q-V-Diagramm)
- Verkehrsdichte–Geschwindigkeit–Diagramm (D-V-Diagramm)

Für deren Darstellung wird die Kenntnis über zumindest zwei der drei Kenngrößen benötigt. Außerdem dient das Fundamentaldiagramm als Grundlage für die Steuerung und Beurteilung der Qualität des Verkehrsflusses sowie die Dimensionierung der Verkehrsanlagen (Kesting, 2010).

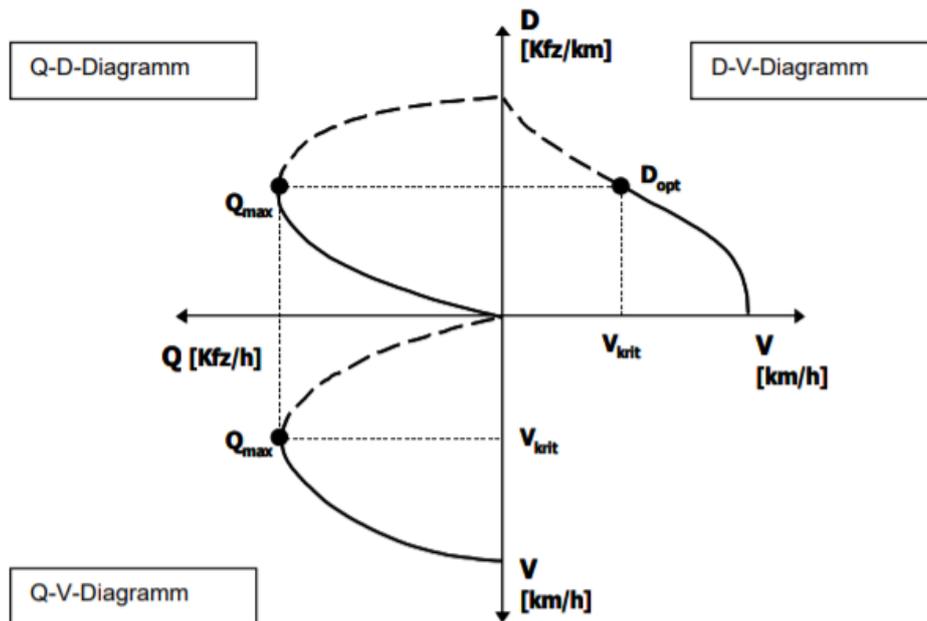


Abbildung 2: Fundamentaldiagramm (Berger, 2012)

- **Verkehrsstärke–Verkehrsdichte–Diagramm (Q-D-Diagramm)**

Das „Q-D Diagramm“ stammt aus der Umrechnung mit der fundamentalen Beziehung und wird oft als das eigentliche Fundamentaldiagramm bezeichnet. Dieses Diagramm umfasst die drei fundamentalen Größen. Das Diagramm zeigt neben der Verkehrsstärke und der Verkehrsdichte auch die momentane Geschwindigkeit. Sie entspricht der Steigung einer Geraden vom Ursprung zu einem Punkt auf dem Diagramm. Der stabile Verkehrsfluss ist durch eine kompakte Punktwolke gekennzeichnet, andererseits gibt es im instabilen Bereich eine große verstreute Punktwolke (siehe Abbildung Fundamental Diagramm). Im Gipfelpunkt des Fundamentaldiagramms gibt die Neigung des Radiusvektors die Geschwindigkeit an, die bei der maximalen Verkehrsstärke, also der Kapazität „ $Q_{max} = C$ “, noch erreicht werden kann.

- **Verkehrsstärke–Geschwindigkeit–Diagramm (Q-V Diagramm)**

Die „Q-V Diagramm“ umfasst die Beziehung zwischen Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit. Auf diese schematische Kurve wird deutlich, dass jede Verkehrsstärke, mit Ausnahme der maximalen, mit zwei Geschwindigkeiten abgewickelt werden kann. Außerdem gilt dieses Diagramm als die Grundlagen der Dimensionierung von Straßenabschnitten. Bei verkehrlich überlasteten Querschnitten entsteht ein parabelförmiges Einhüllen der Punktwolke.

- **Verkehrsdichte–Geschwindigkeit–Diagramm (D-V-Diagramm)**

Im „D-V-Diagramm“ ist es schwierig, zwischen stabilen und instabilen Bereichen zu unterscheiden. Die Punktwolke fällt mit zunehmender Verkehrsdichte immer weiter ab. Diese Abfälle des Diagramms lassen vermuten, dass der Verkehrsfluss stark von der Verkehrsdichte abhängt. Die optimale Verkehrsdichte **D(opt)** und die optimale Geschwindigkeit **V(opt)** liegen im Bereich der maximalen Verkehrsdichte.

2.2 Analyse des Verkehrsüberlastungsbereiches

In diesem Teil werden einige wichtige Begriffe des Verkehrsüberlastungsbereiches definiert. Es wird die Beschreibung der Verkehrsüberlastungen sowie deren Ursachen beschrieben.

2.2.1 Definition der Verkehrsüberlastung

Der Begriff „Verkehrsüberlastung“ bezeichnet einen vorübergehenden Zustand des Verkehrsablaufs. Er ergibt sich aus sowohl regelmäßig wiederkehrender zu hoher Verkehrsnachfrage in Spitzenstunden als auch unvorhersehbaren plötzlich auftretenden Kapazitätsengpässen. Wenn dies der Fall ist wird über Stau gesprochen (Karl Otto Schallaböck, 1999).

2.2.2 Definition der Stau

Unter Stau versteht man einen nicht flüssigen Verkehrsfluss oder eine Störung des Verkehrsflusses. Im überlasteten Bereich mit sehr hoher Verkehrsdichte führen bereits geringe Änderungen der Geschwindigkeit zu In Stationarität. Einerseits nimmt die mittlere Reisezeit durch zunehmende Verkehrsstärke bzw. -auslastung ab einem gewissen Belegungsgrad zu. Auf der anderen Seite wird Stau als gestauter Verkehr definiert, es bezeichnet einen Abschnitt, in dem die Abweichung zur Wunsch-Geschwindigkeit von einer bestimmten Menge an Fahrzeugen um einen definierten Grad überschritten wird, damit der Mindestabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug weiterhin eingehalten werden kann. Um den Begriff Stau eindeutig zu definieren, ist es notwendig, die verschiedenen Arten und Ursachen von Staus zu identifizieren (Karl Otto Schallaböck, 1999).

2.2.3 Ursachen des Staus

Es gibt verschieden Gründe, um Stau auf einer Straße entstehen zu lassen. Der Hauptgrund ist Überlastung, wenn auf den Straßen zu viel Verkehr aufkommt, vor allem während der Urlaubszeit, kommt es oft zu Staus aufgrund der vielen Fahrzeuge, die unterwegs sind. Daher können die Sicherheitsabstände nicht mehr eingehalten werden und das Tempo des Fahrens nicht gleichbleibend ist. Eine andere Ursache sind die Geschwindigkeitsunterschiede. Wenn es viele

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

Autos auf der Straße mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gibt, wird der Abstand nicht eingehalten und daher entsteht Stau. Auf der anderen Seite sind Baustellen auf der Straße eine der Hauptursachen des Staus. Es bezeichnet eine Sperrung eines Streckenabschnittes oder einer Spur. Zudem fahren die Verkehrsteilnehmer*innen langsamer, wenn es auf der Straße ein Unfall passiert, um das Geschehen beobachten zu können. Die meisten Fahrer*innen bremsen am Unfallort ab, sodass ein Stau entsteht [6].

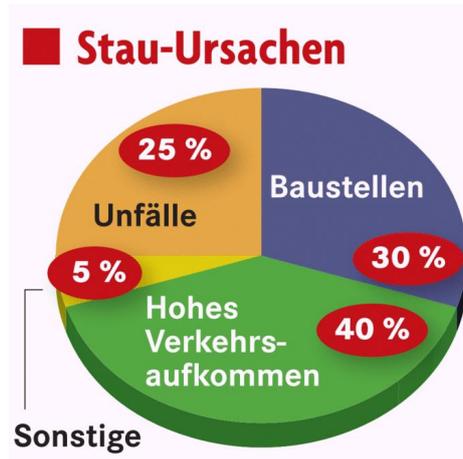


Abbildung 3: Hauptursache von Stau [7]

Die Abbildung 3 stellt den prozentualen Anteil der Faktoren dar, die Staus verursachen. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein hohes Verkehrsaufkommen mit 40% den mit Abstand größten Teil der Ursachen ausmacht. Anschließend kommen die Baustellen auf dem zweiten Platz mit 30%. Gefolgt von den Verkehrsunfällen, die mit einem Viertel die zweithäufigste Ursache darstellen.

3. Verkehr Simulation Software

Dieses Kapitel dient als Vorbereitung auf den Hauptfokus dieser Arbeit. Hierfür wird zunächst die Verkehrssimulation kurz vorgestellt, zusätzlich werden die verschiedenen Verkehrsflussmodelle beschrieben, indem die mikroskopische, makroskopische und mesoskopische Modelle unterschieden werden können. Zudem erfolgt die Definition der Kreuzungsmodelle, wozu beide Modelle FIFO und YTR beschrieben werden. Anschließend wird das eigentliche Ziel der Arbeit noch einmal genannt, indem die verschiedenen Simulationsprogramme festgelegt und anhand daran die einzelnen zu betrachtenden Simulationen des Programms bestimmt werden.

3.1 Definition der Simulation

Die Imitation des Betriebs eines realen Prozesses oder Systems über die Zeit wird Simulation genannt. Die Simulation umfasst die Generierung einer künstlichen Geschichte des Systems und die Beobachtung dieser künstlichen Geschichte, d.h. die Darstellung bestimmter Schlüsseigenschaften oder Verhaltensweisen eines ausgewählten physikalischen oder abstrakten Systems, um daraus Rückschlüsse auf die Betriebseigenschaften des dargestellten realen Systems zu ziehen. Darüber hinaus ist die Simulation eine unentbehrliche Methodik zur Lösung vieler Probleme der realen Welt. Die Simulation wird verwendet, um das Verhalten eines Systems zu beschreiben und zu analysieren und um hypothetische Fragen über das reale System zu stellen (Banks, 1998).

3.2 Definition der Verkehrssimulation

„Unter einem Modell versteht man die (vereinfachte) Nachbildung eines Originalsystems. Das Modell muss dem Originalsystem in Hinblick auf den Zweck seiner Realisierung hinreichend ähnlich sein“ (Saubier, 1999).

Im Verlauf einer Simulation müssen auf Grund von Änderungen viele verschiedene Parameter neu berechnet werden. Diese Änderungen können zeit- oder ereignisbezogen sein, wie in Abbildung 4 dargestellt ist. In einer zeitschrittorientierten Simulation werden die Berechnungen nach jedem Zeitschritt sequentiell durchgeführt. In einer ereignisorientierten Simulation wird der Zustand jedes Mal neu berechnet, wenn sich ein Objekt ändert.

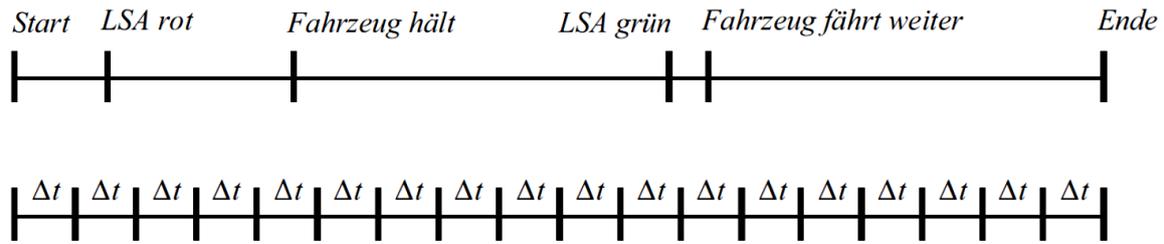


Abbildung 4: Ereignisbasierte (oben) und zeitschrittorientierte (unten)

Wenn sich eine Simulation auf Verkehr oder Verkehrsteilnehmer*innen bezieht, dann ist es eine Verkehrssimulation. Prinzipiell können alle Verkehrssysteme simuliert werden, z.B. Straßenverkehr, Schiffsverkehr, Schienenverkehr, etc. Die Anforderungen an die Simulation sind für jedes Verkehrssystem unterschiedlich, weil es verschiedene Richtlinien gibt und Parameter einen Einfluss haben. Zum Beispiel spielt das Wetter bei der Simulation des Schiffsverkehrs eine wesentlich wichtigere Rolle als bei der Simulation des Eisenbahnverkehrs. Unter einem Simulationsmodell versteht man ein Programm, das Berechnungen für Input-Daten und Modelle mit einem geeigneten Algorithmus durchführt und die Ergebnisse abspeichert oder ausgibt. (Saubier, 1999). Die Input-Daten für eine Verkehrssimulation sind die üblichen Straßenverkehrsparameter wie Fahrzeuggeschwindigkeit, Abstand zwischen den Fahrzeugen, Fahrzeugtyp usw.

Der menschliche Faktor ist ein ebenso wichtiger Faktor für Verkehrssimulationen. Menschen verhalten sich in der gleichen Situation sehr unterschiedlich, denn jeder Mensch hat seinen eigenen Charakter und dies gilt auch für den Straßenverkehr und das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer*innen. Hier lassen sich zwei Arten von Fahrer*innen auf den Straßen unterscheiden:

- Unaufmerksame Fahrer*innen: Sie achten nicht wirklich auf ihre Umgebung, sie fahren sehr aggressiv und fahren möglicherweise schneller als die Geschwindigkeitsbeschränkungen erlauben.
- Es gibt auch ängstliche Fahrer*innen, die weit unter der Geschwindigkeitsbegrenzung fahren und übermäßig vorsichtig mit den Straßenverkehrsregeln sind.

All diese Faktoren spielen eine Rolle für das allgemeine Fahrverhalten im gesamten Verkehr. Zur Integration all dessen in eine Simulation, d.h. als Teil des Berechnungsmodells, wurden Modelle des menschlichen Verhaltens analysiert und auf der Grundlage dieser Beobachtungen verschiedene Verhaltensmodelle entwickelt. So studierte Wiedemanns Verhaltensmodell das Fahrverhalten in und außerhalb der Städte. Verkehrssimulationen können einen unterschiedlichen Grad an Realismus erreichen. Die Berechnungen werden umso komplexer und aufwendiger, je ausführlicher das Verkehrsflussverhalten dargestellt wird.

Diese Arbeit befasst sich exklusiv mit dem System des Straßenverkehrs ohne öffentliche Verkehrsmittel und ohne Fußgänger*innen. Dieses System ist als Ganzes sehr komplex und folglich

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

sehr schwierig, es vollständig korrekt in Form eines Simulationsmodells zu beschreiben (Wiedemann, 1974).

3.3 Verkehrsflussmodelle

Verkehrsflussmodelle sind zeitdynamisch, d.h. der Zustand des Systems ändert sich dynamisch mit der Zeit und wird in diskreten Zeitintervallen in bestimmten Zeitschritten berechnet. Auf diese Weise kann das Verkehrssystem zu verschiedenen Zeiten, z.B. im Tagesverlauf, modelliert und beobachtet werden (Dallmeyer, 2014).

3.3.1 Arten von Verkehrsmodellen

In diesem Unterkapitel wird zwischen den verschiedenen Arten von Verkehrssimulationen unterschieden. Verkehrsflussmodelle, wie in der folgenden Abbildung 5 deutlich wird, können nach ihrem Detaillierungsgrad in Makro-, Meso-, Mikro- und submikroskopischen Modelle eingeteilt werden. Die makroskopische Verkehrssimulation hat den niedrigsten Detaillierungsgrad und wird für großflächige Simulationen verwendet. Mikroskopische Simulationen sind am detailliertesten, und mesoskopische Simulationen sind eine Kombination aus beidem. Hieran anschließend wird ausführlicher auf die einzelnen Typen eingehen (Burghout, 2004).

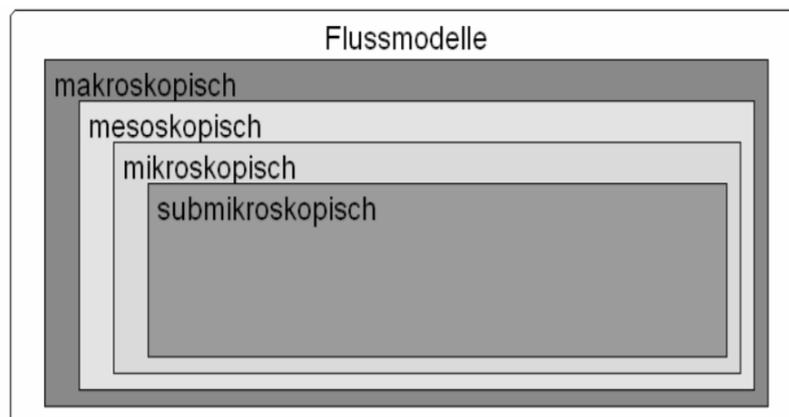


Abbildung 5: Die verkehrstechnischen Flussmodelle [8]

3.3.1.1 Makroskopische Modelle

Die Verkehrsmodellierung ist seit den frühen 1950er Jahren, als die ersten mikroskopischen Verkehrsmodelle erschienen, ein interessantes Forschungsgebiet. Der übliche Begriff für Simulationen, die den Verkehr als Fluss modellieren, ist die makroskopische Simulation. Der Einsatz dieser Instrumente wurde durch die Entwicklung umfassender Verkehrsmesssysteme, die in großen städtischen Gebieten und auf Autobahnen installiert sind, wesentlich erweitert und erleichtert. Ein

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

zusätzlicher Faktor, der zur Verbreitung makroskopischer Modelle beigetragen hat, ist die für diese Modelle erforderliche Datenmenge (Flüsse, Geschwindigkeiten, Dichte) auf der gleichen Ebene der Aggregation wie die von den Messungen gelieferten Daten.

Makroskopische dynamische Modelle wie das Lighthill and Whitham- oder Richards LWR-Modell beschreiben die Entwicklung des Verkehrs in Zeit und Raum mit Hilfe einer Reihe von Differentialgleichungen (F.Daganzo, 1994) (Burghout, 2004).

Es gibt drei grundlegende Variablen:

- Fluss q , die Geschwindigkeit, mit der Fahrzeuge einen Punkt passieren.
- Dichte k , die räumliche Konzentration von Fahrzeugen.
- Geschwindigkeit u , die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit.

Die Beschreibung des Verkehrs, wie z.B. Strömungen in Flüssigkeiten oder Gasen, erfolgt mit Hilfe des LWR-Modells. Diese Gleichungen können analytisch oder durch Simulation gelöst werden. Für die Bewertung einzelner Straßenabschnitte können immer analytische Methoden eingesetzt werden. Wenn es jedoch notwendig ist, das räumlich-zeitliche Zusammenwirken der Verkehrsströme im Straßennetz zu bewerten, wird in der Regel die Simulation als Lösung eingesetzt.

Laut Daganzo gehen makroskopische Modelle davon aus, dass das aggregierte Verhalten von Fahrzeugsätzen, das leichter zu beobachten und zu validieren ist, von den Verkehrsbedingungen in ihrer Umgebung abhängt. Die hydrodynamische Theorie des Verkehrsflusses LWR liegt den meisten dieser Modelle zugrunde. Obwohl sie nicht perfekt ist, sind ihre Unzulänglichkeiten bekannt, und sie wird zu Recht und routinemäßig in Verkehrsanalysen verwendet. Allerdings unterscheiden die meisten makroskopischen Modelle ihre Komponentenströme leider nicht nach dem Zielort.

Daganzo hat das LWR weiterentwickelt und wird in Zellen diskretisiert. Die Straße wird durch eine Anzahl von kleinen Ausschnitten eingeteilt (Zellen). Das Simulationsmodell verfolgt die Anzahl der Fahrzeuge in jeder Zelle und in jedem Zeitschritt wird die Anzahl der Fahrzeuge berechnet. Dieser Fluss von einer Zelle zur anderen hängt davon ab, wie viele Fahrzeuge von der vorgeschalteten Zelle gesendet und wie viele durch die nachgeschaltete Zelle empfangen werden können. Die Anzahl der Fahrzeuge, die gesendet werden können, ist eine Funktion von der Dichte in der vorgeschalteten Zelle und die Anzahl, die empfangen werden, hängt ab von der Dichte in der Empfangszelle (F.Daganzo, 1994).

Das METACOR-Modell basiert ebenfalls auf einer makroskopischen und dynamischen Modellierungsphilosophie. Der Verkehrsfluss wird als ein Fluid mit spezifischen Eigenschaften betrachtet. Der Fluss wird in Zellen unterteilt, für die in diskreten Zeitintervallen durch Auswertung

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

makroskopischer Differentialgleichungen Fluss, Geschwindigkeit und Dichte berechnet werden. In jedem Zeitintervall werden auch die Wechselwirkungen der aufeinanderfolgenden Zellen in Bezug auf Geschwindigkeit und Dichte berechnet. Schritt für Schritt liefern diese Berechnungen eine Annäherung an die zeitliche und räumliche Dynamik des Transportsystems. So bilden die interagierenden Zellen eine Straße und können durch Kreuzungen verbunden werden. METACOR beinhaltet Verkehrszuweisungsfähigkeiten, bei denen Teilströme von Fahrzeugen mit gemeinsamen Zielen explizit berücksichtigt und entlang von Netzverbindungen geleitet werden. An Kreuzungen werden die Teilströme entsprechend den angestrebten Verteilungsraten gelenkt (Papageorgiou, 1997).

3.3.1.2 Mikroskopische Modelle

Bei der mikroskopischen Simulation wird der Verkehr unter dem Mikroskop beobachtet, so dass die Verkehrsteilnehmer*innen den Verkehr bestimmen und das Verhalten beobachtet werden kann. Mikroskopische Modelle repräsentieren heute jedes Fahrzeug und müssen auch andere Einflüsse berücksichtigen, wie z.B. die Wechselwirkung zwischen den Fahrzeugen, individuelle Eigenschaften, wie das Brems- bzw. Beschleunigungsverhalten des Fahrzeugs, aber auch die individuellen Eigenschaften der Straßenumgebung (Vorfahrtsregeln, Ampeln) berücksichtigen. Außerdem kommt zusätzlich die "menschliche" Komponente als Fahrer*in hinzu, was bedeutet, dass ihre Wahrnehmungs- und Reaktionsfähigkeit berücksichtigt werden muss. Im Vergleich zur makroskopischen Simulation wird dies allerdings nur als der Durchschnitt wichtiger Verkehrsvariablen für einen Straßenabschnitt, wie Geschwindigkeit, Fluss oder Dichte, erfasst. Um den Durchschnitt zu bestimmen, wird die Anzahl der Fahrzeuge gemessen, die einen Kontrollpunkt pro Zeiteinheit passieren, und für die Dichte werden die Fahrzeuge pro Kontrollpunktabschnitt gezählt. Aus der Sicht des einzelnen Fahrers ist dies z.B. für die Routenplanung wichtig. Diese sollte so dynamisch wie möglich sein und hängt sowohl von der aktuellen Verkehrssituation als auch von individuellen Merkmalen wie der zu berücksichtigenden Höchstgeschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs ab (Pflüger, 2009).

3.3.1.3 Mesoskopische Modelle

Mesoskopische Modelle sind eine Kombination aus makroskopischen und mikroskopischen Ansätzen, wie die nächste Abbildung (6) zeigt. Dies hat zur Folge, dass zwar große Netzwerke und allgemeine Größen gebildet werden, aber auch die Fahrzeuge werden jetzt als Einzelemente modelliert. Mesoskopische Modelle eignen sich daher besonders gut für Fragen der Routenwahl und Verkehrlenkung. Mikroskopische Modelle bieten eine fahrzeuggenaue Auflösung und damit eine sehr präzise Abbildung des Verkehrs.

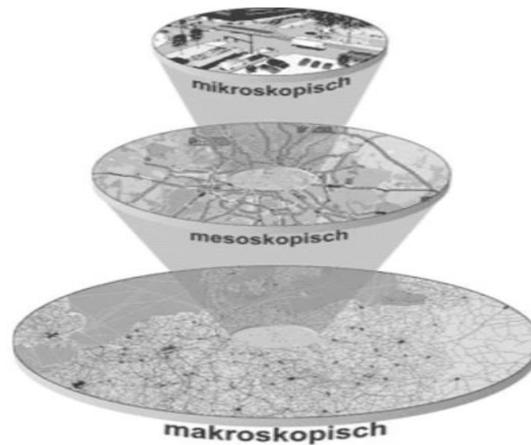


Abbildung 6: verschiedene Simulationsmodelle im Verkehr [8]

3.3.2 Kreuzungsmodelle

Die verschiedenen Fahrspuren einer vierspurigen Kreuzung wurden zunächst getrennt modelliert (Norden, Osten, Süden und Westen). Für jede Fahrspur wurde ihre eigene Ankunftsrate berechnet.

Wenn sich jedes ankommende Fahrzeug in der Warteschlange für die Fahrspur befindet, wird jedem ankommenden Fahrzeug eine Abbiegerichtung zugewiesen, die auf Prozentsätzen derselben diskreten Fahrzeugbeobachtungen basiert. Die tatsächlichen Overhead-Kosten der Fahrspurkreuzung wurden in vier Ressourcen aufgeteilt, wobei die Fahrzeuge eine bestimmte Kombination dieser Ressourcen benötigen, um das gewünschte Fahrmanöver durchzuführen. Beispielsweise benötigt ein Fahrzeug auf der Ostspur, das nach links auf die Südspur abbiegt, die Ressourcen 1, 2 und 3. Es wurde eine geschätzte Zeit für die Durchführung des Manövers zugewiesen und sobald das Fahrzeug die Kreuzung überfahren hatte, hat es die Simulation verlassen. Dieses Beispiel wird in der folgenden Abbildung 7 schematisch verdeutlicht.

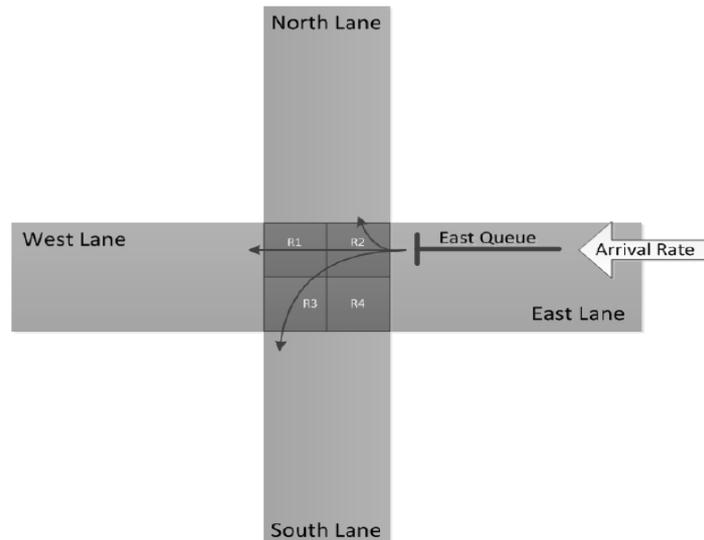


Abbildung 7: Kreuzungsdiagramm mit Hervorhebung der Fahrwege für die Fahrspur in Richtung Osten

3.3.2.1 First In First out

FIFO steht für "First-In, First-Out". Dieses Modell soll das Verhaltensmuster des Fahrers widerspiegeln, bei dem das Fahrzeug an der Spitze der Warteschlange in jeder Spur entscheidet, wer fahren darf, basierend darauf, wer am längsten in der Warteschlange steht.

Darüber hinaus wäre ein mögliches Beispielszenario, wenn ein Fahrzeug ein Manöver beginnt und ein zweites Fahrzeug die Kreuzung passieren möchte, obwohl es nicht an der Reihe ist. Dies wäre z.B. der Fall, wenn das Führungsfahrzeug auf der östlichen Fahrspur die Vorfahrt hat, um in westlicher Richtung in die Kreuzung einzufahren, während sich gleichzeitig das Führungsfahrzeug auf der westlichen Fahrspur in östlicher Richtung bewegt. Beide würden ihre Manöver abschließen, auch wenn das westlich fahrende Fahrzeug nicht an der Reihe wäre, in die Kreuzung einzufahren. Um zu erfassen, wann das führende Fahrzeug auf jeder Fahrspur die Position des führenden Fahrzeugs eingenommen hat, wurde eine Variable zur Durchführung dieses Prioritätsschemas eingerichtet, die dann über die vier Fahrspuren hinweg verglichen wurde. Dem Fahrzeug mit der nächstgelegenen Ankunftszeit wurde eine höhere Priorität für das Überqueren der Kreuzung zugewiesen als den anderen Fahrspuren. Falls sich Fahrzeuge hinter dem ersten Fahrzeug in einer Reihe befanden, wurde ihre Zeit zur Übernahme der Führung als die Zeit angegeben, zu der das vorausfahrende Fahrzeug in die Kreuzung einfuhr (Claudio, 2014).

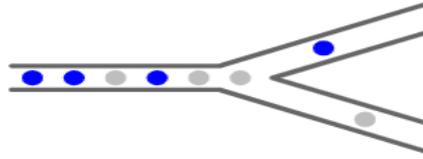


Abbildung 8: FIFO-Kreuzungsflussmodell [11]

3.3.2.2 Yield-To-Right (YTR) Model

Das YTR-Modell (Yield-To-Right) stellt die gesetzlichen Regeln des Yielding an unmarkierten Knotenpunkten in vielen Regionen dar.

Wenn zwei Fahrzeuge gleichzeitig an einer 4-spurigen Haltelinie ankommen und sich nebeneinander befinden, hat bei dieser Methode das Fahrzeug Priorität, das am weitesten rechts steht und dadurch Vorfahrt hat. Wenn drei Fahrzeuge gleichzeitig ankommen, muss das am weitesten links stehende Fahrzeug so lange nachgeben, bis die beiden anderen Fahrzeuge rechts davon vorbei gefahren sind. [10]

Zur Erstellung des YTR-Modells wurden globale Variablen verwendet, welche die Priorität der einzelnen Bahnen demonstrieren. Eine bestimmte Fahrspur hat die höchste Priorität, um in die Kreuzung einzufahren und wenn dieses Fahrzeug das System verlässt wird die höchste Priorität dann im Uhrzeigersinn auf die nächste Fahrspur im Zyklus verschoben. Ebenso wie bei der FIFO-Methode gilt auch hier die Regel: Wenn zwei Fahrzeuge gleichzeitig in die Kreuzung einfahren und ihre Manöver durchführen können, werden sie dies auch tun (Claudio, 2014).

3.4 Verkehrssimulationsprogramm

Verkehrssimulationen sind für das Verkehrsmanagement sehr wichtig. Neue Verkehrsstrategien ermöglichen es, die Simulation zu implementieren und zu analysieren, bevor sie im realen Verkehr eingesetzt wird. Aus zahlreichen Gründen (Kosten, Stau, Sicherheitsrisiken) sind Untersuchungen von Maßnahmen und deren Auswirkungen oder Prognosen im aktuellen Verkehr nur eingeschränkt möglich. Daher bietet die Computersimulation eine gute und angemessene Variante. Anwendungsbereiche sind unter anderem Stauforschung, Verkehrstechnik, Fahrerassistenz und Routenplanung. Verkehrssimulationen lassen sich in drei grundlegende Modelle unterteilen, die in den vorhergehenden Kapiteln erläutert wurden: Makro-, mikro- und mesoskopische Modelle. Der Detaillierungsgrad und Realismus des Simulationsmodells hängt von mehreren Faktoren ab. Der wichtigste Faktor ist, ob das Modell die zu untersuchenden Szenarien aus verkehrstechnischer Sicht realistisch abbildet. Die Verkehrssimulation wird heute nicht nur von öffentlichen und privaten Kunden sowie Ingenieur- und Beratungsunternehmen genutzt, sondern auch in Forschung und

Lehre eingesetzt. Dank der Verkehrssimulation können Sie eine Vielzahl von Informationen liefern über:

- Vergleich der Knotengeometrie: Hier sehen Sie die verschiedenen Knotengeometrien, sowie den Verkehr für die verschiedenen Knotenvarianten und die grafische Darstellung der Verkehrsströme, sowie Interaktion zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln wie öffentlichen Verkehrsmitteln, Radfahrern, Fußgängern usw. bestimmen.
- Kapazitätsanalyse
- Verkehrsentwicklungsplanung
- Simulation des öffentlichen Verkehrs
- Verkehrskontrolle: d.h. Verkehr auf mikroskopischer Ebene zu analysieren und zu visualisieren. Maßnahmen zur Beschleunigung des Verkehrsflusses zu ergreifen und Simulationen verschiedener Verkehrsparameter wie Geschwindigkeit, Fahrzeit, Zeitverlust oder Staulänge sowie die Auswirkungen von verkehrabhängigen Steuerungssystemen und Wechselverkehrszeichen zu ermitteln [9]

Im nächsten Untertitel werden die folgenden vier Verkehrssimulationsprogramme SUMO, VISSIM, MatSim, AIMSUN und CORSIM betrachtet und definiert.

3.4.1 SUMO

SUMO "Simulation of Urban Mobility" ist eine frei zugängliche, mikroskopische, kontinuierliche, raum-kontinuierliche und zeitdiskrete Verkehrssimulationsplattform, die für große Netzwerke konzipiert wurde. Sie ermöglicht eine intermodale Simulation unter Berücksichtigung von Fußgängern und verfügt über eine Vielzahl von Werkzeugen zur Szenarienbildung. Sie wird hauptsächlich von Mitarbeiter*innen des Instituts für Verkehrssysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt entwickelt. Ihr Ziel ist es, die Bewegung von Personen, Fahrzeugen und Gütern über verschiedene Verkehrsträger hinweg zu modellieren. Dazu gehört die Simulation von Personenkraftwagen, Lastkraftwagen, Fußgängern und Zweirädern, inzwischen aber auch des öffentlichen Verkehrs, der sowohl straßen- als auch schienengebunden ist. Es ist möglich, multimodale Simulationen an einzelnen Knoten bis hin zu großräumigen Szenarien, z.B. stadtweiten performant durchzuführen und bei entsprechenden Anforderungen dynamisch anzupassen und zu beeinflussen. Für Simulationen des reinen Eisenbahn-Verkehrs sind auch größere Beobachtungsräume (wie z.B. Deutschland) technisch problemlos realisierbar [10].

3.4.2 MATSim

MATSim (Multi-Agent Transport Simulation) wird für die Implementierung von groß angelegten agentenbasierten Transportsimulationen verwendet. Das Rahmenwerk besteht aus mehreren Modulen, die in Kombination oder einzeln verwendet werden können. Die Module können durch Ihre eigenen Implementierungen ersetzt werden, um einzelne Aspekte der Arbeit zu testen. Heutzutage liefert MATSim, wie in Abbildung 9 dargestellt, einen Rahmen für Bedarfsmodellierung, agentenbasierte Mobilitätssimulation (Verkehrsflusssimulation), Neuplanung, einen Steuerer zur Durchführung iterativer Simulationen und Methoden zur Analyse der von den Modulen erzeugten Ergebnissen [12].

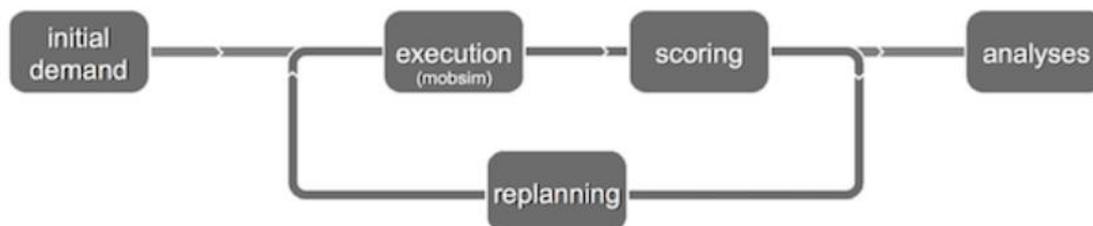


Abbildung 9: Prozessablauf in MATSim [12]

Um die Grundfunktionen von MATSim zusammenzufassen, handelt es sich um eine Open-Source-Software, die einfach dadurch benutzt werden kann, dass man die Software in ihrer Originalsoftware anwenden kann ohne Änderungen vornehmen zu müssen. Es reicht, wenn man seine Daten selbst eingeben und die Konfiguration für die Simulation ändern kann. Für fortgeschrittenere Anwendungen ist es notwendig, dass man seinen eigenen Programmcode schreibt, der sich in MATSim integriert, z.B. um spezielle Funktionen oder seine eigenen benutzerdefinierten Analyseergebnisse zu erhalten [13].

3.4.3 AIMSUN

Der Hersteller von AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks) ist ein führender internationaler Anbieter von Software und Dienstleistungen für Verkehrsplanung, Simulation und Prognose. AIMSUN ist eine integrierte Verkehrsmodellierungssoftware, die auch mikroskopisch ist. Der Mikrosimulator AIMSUN modelliert das Verhalten jedes einzelnen Fahrzeugs im System durch den Simulationsschritt. AIMSUN verwendet Treiber-Betriebsalgorithmen zur Simulation der Bewegung jedes einzelnen Fahrzeugs. Modelle zur Fahrzeugverfolgung, zum Spurwechsel und zur Gap-Acceptance.

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

Der Test umfasst einen sehr großen Anwendungsbereich. Sie können öffentliche Verkehrsmittel, Personenkraftwagen, Fußgänger, Fahrräder und Motorräder in Autobahn- und Stadtgebieten testen und simulieren. Im Gegensatz zu anderen Werkzeugen ist eine virtuelle Umgebung nicht auf eine festgelegte Route beschränkt, hat keine vorgegebene Anzahl von Akteuren oder Sequenzen und kann den Testumfang ohne umfangreichen und aufwändigen Eingriff variieren. Der Mikrosimulator AIMSUN modelliert das Verhalten jedes Fahrzeugs im System durch den Simulationsschritt und bietet detaillierte Möglichkeiten zur Modellierung von Verkehrsnetzen, die mit verschiedenen Fahrzeugtypen (PKW, LKW...) umgehen können. Die Tests mit Autos können außergewöhnliche Szenarien beinhalten, die vor Ort zu teuer oder unmöglich durchzuführen wären.

AIMSUN kann auch die Auswirkungen von variablen Ereignissen und variablen Nachrichtensignalen modellieren und statistische Informationen über Transportvorgänge auf verschiedenen räumlichen Ebenen sammeln. Neben seinen sehr detaillierten Modellierungsmöglichkeiten bietet AIMSUN auch große Flexibilität, da eine API (Application Programming Interface) zur Interaktion mit benutzerdefinierten Anwendungen zur Verfügung steht, so dass diese mit seinem internen Mikrosimulator verbunden werden können. Die Benutzer-API kann sowohl in Python als auch in C++ geschrieben sein und sammelt Daten aus dem internen Mikrosimulator von AIMSUN. Auch während der Simulation können Variablen geändert werden [14][15].

3.4.4 VISSIM

VISSIM „Verkehr in Städten – Simulation“ wird seit 1979 von der Karlsruher PTV Planung Transport Verkehr entwickelt. Wie schon der Name sagt, ist VISSIM auf den innerstädtischen Verkehr spezialisiert und kann auch den Autobahnverkehr simulieren.

Das Modell basiert auf dem psycho-physischen Fahrverhalten nach Wiedemann. Es gibt vier Fahrmodelle: freie Fahrt, Annäherung, Verfolgung und Bremsen. Wenn ein bestimmter Schwellenwert erreicht wird, "schaltet" das System von einem Modus in den anderen um. In VISSIM gibt es zwei Arten des Spurwechsels: notwendiger und freier Spurwechsel. Der notwendige Spurwechsel wird vorgenommen, um den nächsten Verbindungsabschnitt einer Strecke zu erreichen, der freie Spurwechsel dient dem schnelleren und/oder komfortableren (mehr Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug) Vorankommen, wie in der folgenden Abbildung dargestellt [16] [17].

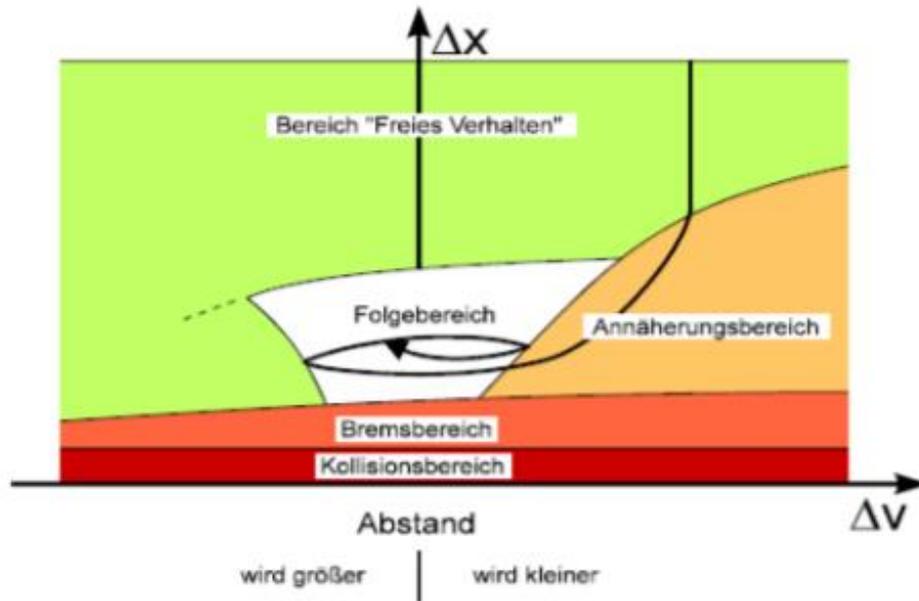


Abbildung 10: Fahrzeugfolgmodell nach Wiedemann [18]

Die Anwendungsbereiche umfassen den Entwurf von Knotenpunkten, Untersuchungen zur Verkehrssteuerungstechnik und Anzeigen zur Entscheidungsfindung in politischen Gremien. Darüber hinaus wird die Integration von Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs, Fahrrädern und Fußgängern unterstützt. Die ermittelten Simulationsdaten können direkt mit der Makroplanungssoftware VISSUM, die ebenfalls von PTV vertrieben wird, ausgetauscht werden. Es wird ein komplexes Verkehrsnetzmodell angewendet. Darüber hinaus werden je nach Fahrzeugtyp und mit drei verschiedenen Zuweisungsmethoden (stochastisch, dynamisch, benutzerdefiniert) unterschiedliche Routen zur Verfügung gestellt. Das öffentliche Verkehrssystem wird auf sehr komplexe Weise modelliert und erlaubt daher die Untersuchung der Beschleunigung des öffentlichen Verkehrs, beispielsweise durch intelligente Steuerung von Lichtsignalen [17][19].

3.4.5 CORSIM

In den Vereinigten Staaten ist CORSIM das am häufigsten verwendete mikroskopische Verkehrssimulationsprogramm. Dieses Simulationswerkzeug wird von der Bundesautobahn verwendet und seit den 1970er Jahren kontinuierlich weiterentwickelt.

CORSIM besteht aus einem integrierten Satz von zwei mikroskopischen Simulationsmodellen, die das gesamte Verkehrsumfeld abbilden. NETSIM steht für den Verkehr auf Stadtstraßen und FRESIM für den Verkehr auf Autobahnen.

Die mikroskopischen Simulationsmodelle stellen die Bewegungen verschiedener Fahrzeuge und Einflüsse auf das Fahrerverhalten dar. Die Auswirkungen sehr detaillierter Strategien, wie z.B. die

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

Verlegung von Busbahnhöfen oder der Wechsel von Parkplätzen, können mit Hilfe solcher Modelle untersucht werden. Das Programm weist viele Ähnlichkeiten mit VISSIM auf [20][21].

3.4.6 Vor- und Nachteile von SUMO

Die Vor- und Nachteile des Sumo-Programms werden in der folgenden Tabelle 1 und in diesem Abschnitt erläutert. Die kostenfreie und offene Simulationssoftware hat den Vorteil, dass neue Verfahren und Konzepte auf einfache Weise getestet werden können. Wenn das Potenzial kommerzieller Simulationswerkzeuge ausgeschöpft ist, müssen Forscher*innen und Entwickler*innen keine eigene Verkehrssimulation mehr aufstellen. SUMO lässt sich ohne großen Aufwand mit eigenen Modulen erweitern und kann ebenfalls mit anderen Modellen vergleichbar gemacht werden. Zusätzlich zur reinen Verkehrssimulation stellt SUMO auch verschiedene Werkzeuge zur Erstellung, Durchführung und Auswertung der Simulation von Verkehrsszenarien zur Verfügung. Es ist möglich, Netzwerke auf der Grundlage von OpenStreetMap-Daten zu erstellen und ACTIVITYGEN zu verwenden, um die Verkehrsnachfrage und -aktivität aus diesen Daten zu modellieren. Es ist ebenfalls möglich, verschiedene Transportmittel zu modellieren. Sumo kann verwendet werden, um die kostengünstigste Agentenroute auf der Grundlage des tatsächlichen Verkehrsaufkommens zu bestimmen. Die Applikationslandschaft bei SUMO bietet eine flexible und einfache Erweiterung mit eigenen Skripten und Programmen. Der Quellcode aller Anwendungen und Dokumentationen ist frei verfügbar. Leider ist in Sumo nicht klar, wie die Verkehrsmittel Fahrrad und Zug integriert werden können, ebenfalls können die Routen nicht mit öffentlichen Verkehrsmitteln berechnet werden. ACTIVITYGEN ist eine zentrale Anwendung für die aktivitätsbasierte Verkehrssimulation, aber es ist noch nicht bekannt, wie weit sie erweitert werden kann [10].

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von SUMO

Vorteile	Nachteile
Bereitstellung verschiedener Werkzeuge für die Erstellung, Durchführung und Auswertung von Verkehrsszenario Simulationen	Die Integration von Fahrrad- und Bahnverkehrsmitteln ist nicht immer leicht zu berechnen.
Erweiterung mit geringem Aufwand durch eigene Module	Die Möglichkeiten zur Erweiterung von ACTIVITYGEN sind noch nicht bekannt
Kostenloses Programm	Die Berechnung von Routen mit öffentlichen Verkehrsmitteln ist nicht möglich.
Erstellen von Netzwerken aus OpenStreetMap-Daten	
Verwendung von ACTIVITYGEN zur Modellierung der Verkehrsnachfrage und -aktivität auf der Grundlage der Daten	
Ermöglichung der Modellierung verschiedener Transportmittel	
Bestimmung der kostengünstigsten Agentenroute auf der Grundlage des tatsächlichen Verkehrsaufkommens.	
Die Applikationslandschaft bei SUMO erlaubt eine flexible und einfache Erweiterung mit eigenen Skripten und Programmen	

3.4.7 Vor- und Nachteile von MATSim

MATSim hat viele Vorteile, die in Tabelle 2 beschrieben sind, wie zum Beispiel die Erstellung von Netzwerken aus OpenStreetMap-Daten und Modellierung des Verkehrsaufkommens auf der Grundlage von Nachfrage und Aktivität in Tagesplänen.

Auch die Möglichkeit, verschiedene Transportmittel zu modellieren, ist gegeben. Der entscheidende Nachteil ist der Implementierungsaufwand, der mit jedem neuen Detail, d.h. mit zunehmendem Detaillierungsgrad und Genauigkeit der Kartierung, erheblich zunimmt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Vor- und Nachteile von MATSim

Vorteile	Nachteile
Erstellen der Netzwerke aus OpenStreetMap-Daten	Die Modellierung des Fahrradverkehrs ist unklar
Modellierung des Verkehrsaufkommens auf der Grundlage von Nachfrage und Aktivitäten in Tagesplänen	Einige Anwendungen und Dokumentationen ausgeschlossen, da sie kommerziell vertrieben werden
Die Möglichkeit verschiedene Transportmittel zu modellieren ist gegeben	Es ist noch nicht klar, wie einfach es wäre, den Tagesplan zu erweitern oder andere Einflüsse auf die Wahl des Verkehrsmittels einzubeziehen
Die Berechnung von Routen mit öffentlichen Verkehrsmitteln ist möglich	Implementierungsaufwand
Der Quellcode von MATSim ist OpenSource und die meisten Anwendungen sind frei verfügbar	

3.4.8 Vor- und Nachteil von Aimsun

Alle Befehle, die für die LPOE (Land Ports of Entry)-Modellierung erforderlich sind, stehen in Aimsun im Standardmenü zur Verfügung. In Spitzenzeiten kommt es zu erheblichen Verzögerungen von bis zu 60 Minuten für LPOE-Benutzer. Um diese Überlastbedingungen und Verzögerungen korrekt zu modellieren, sind spezifische Befehle für den Modellierer erforderlich. Das Programm Aimsun bietet leistungsstarke Optionen zur Rampenmessung, die es ermöglichen, verschiedene Verzögerungswerte in Verbindung mit der Standardabweichung pro spezifizierter Zeitperiode zu modellieren. Diese Möglichkeit wurde genutzt, um die Wartezeiten in den Inspektionskabinen bei Aimsun zu modellieren und zu kalibrieren. Die Software ist stabil und auch die Benutzerschnittstelle ist benutzerfreundlich.

Aber auch Aimsun hat einige Nachteilen, z.B. muss der Drehbewegungstisch für jede Periode festgelegt werden, was bei der Navigation zwischen verschiedenen Perioden zum Ändern von Zahlenwerten arbeitsintensiv sein kann. Hintergrundkarten sind nicht in die Software integriert. Jedes Mal, wenn der Anwender das Aimsun-Projekt öffnet, muss er die gespeicherte Karte für ein bestimmtes Gebiet manuell auswählen. Die folgende Tabelle beschreibt ebenfalls die Vor- und Nachteile.

Tabelle 3: Vor- und Nachteil von Aimsun

Vorteile	Nachteile
Im Standardmenü sind alle für die Modellierung erforderlichen LPOE-Befehle (Land Ports of Entry) verfügbar	Für jede Zeitperiode definiert Aimsun einen Drehbewegungstisch, was unpraktisch sein kann, wenn man zwischen verschiedenen Zeitperioden navigiert, um die Zahlenwerte zu ändern
Die Modellierung und Kalibrierung verschiedener Verzögerungswerte in Verbindung mit der Standardabweichung pro spezifizierter Zeitperiode ist mit Hilfe von Rampenmessungsoptionen möglich	Bei jedem Öffnen des Aimsun-Projekts die gespeicherte Karte für ein bestimmtes Gebiet manuell zu bestimmen müssen
Die Benutzeroberfläche ist benutzerfreundlich	Die Software enthält keine Hintergrundkarten
Stabil Software	

3.4.9 Vor- und Nachteile von VISSIM

Für das Routing von Fahrzeugen verfügt VISSIM über ein leistungsfähiges Entscheidungsmodell, das die Erfassung einer großen Menge von Zählwerten für Kurvenfahrten erleichtert. Die Daten können einfach per Kopieren und Einfügen in VISSIM eingefügt werden, wenn dem Benutzer die Daten in einer Excel-Tabelle vorliegen. Im Modell lässt sich das Fahrverhalten für jede Verbindung separat modellieren. Dadurch ist die Modellierung eines aggressiveren Fahrverhaltens in der Nähe von Inspektionsstationen mit hohen Wartezeiten möglich. Aufgrund der Verkehrsbedingungen sind die Fahrspurwechselmanöver tendenziell aggressiver. Diese Verhaltensweise kann die Simulation mit ihren Standardparametern nicht reproduzieren. Die Hauptstärke von VISSIM liegt darin, dass der Benutzer leicht die Fahrspur wechseln kann. Für jede Verbindung wird das Verhalten definiert, da sich die aggressiveren Verhaltensweisen nicht auf andere Teile des Netzwerks beziehen, sondern ausschließlich auf Verbindungen in der Nähe der Inspektionsstationen.

Aber falls kein Skript zur Verfügung steht oder der Modellierer über keine starken Programmierkenntnisse verfügt, benötigt er viel Zeit, um das Modell hinsichtlich der Wartezeit richtig zu validieren. Im Vergleich zu Aimsun gibt es keine Standardoption, um die Modellierung auf bestimmte Zeiträume zu verschieben. In VISSIM haben Stoppschilder die Möglichkeit der

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal
 Zeitverteilung (Verzögerung), jedoch nur für die gesamte Simulationsperiode, nicht für bestimmte Zeiträume.

Das Fahrspurwechselverhalten im Stau muss vorsichtig angepasst werden, da sich Fahrzeuge sonst nicht realistisch verhalten. Werden die Parameter z.B. auf ihren Standardwerten belassen, sind einige Fahrspuren, die sich der Kontrollstation nähern, leer, während andere voll von Schlange stehenden Fahrzeugen sind. Dies bezieht sich auf den Standardsatz von Fahrverhaltensparametern. Zur Abschwächung dieser Art von Verhalten muss der Benutzer aggressivere Fahrverhaltensparameter festlegen. Darüber hinaus verfügt VISSIM nicht über den richtigen Werkzeugkasten, um Straßensperren zu verwalten.

Wenn ein Benutzer bestimmte Fahrspuren für einen bestimmten Zeitraum sperren möchte, muss er dies mit entsprechend geschriebenem Code (z.B. VBA, Python, C++ usw.) und in Verbindung mit VISSIM tun. Die Vorteile und Nachteile von VISSIM werden in der folgenden Tabelle erläutert.

Tabelle 4: Vor- und Nachteile von VISSIM

Vorteile	Nachteile
Entscheidungsmodell, das die Erfassung einer großen Menge von Zählraten für Kurvenfahrten erleichtert.	Das Programm ist schwer zu verstehen und zu verarbeiten
Die Daten können einfach per Kopieren und Einfügen in VISSIM eingefügt werden	Stoppschilder die Möglichkeit der Zeitverteilung (Verzögerung), allerdings nur für die gesamte Simulationsperiode, nicht für bestimmte Perioden.
Die Modellierung eines aggressiveren Fahrverhaltens in der Nähe von Inspektionsstationen mit hohen Wartezeiten möglich.	Fahrspurwechsel im Stau müssen sorgfältig angepasst werden, andernfalls verhalten sich die Fahrzeuge nicht realistisch.
Der Benutzer leicht die Fahrspur wechseln kann.	Sollte es bestimmte Fahrspuren für eine bestimmte Zeit sperren, muss es dies mit entsprechend geschriebenem Code (z.B. VBA, Python, C++, etc.) tun und ihn mit VISSIM verknüpfen.
Die Definition des Verhaltens erfolgt für jede Verbindung.	

4. Die Einführung von SUMO

Die Generierung von SUMO-Straßennetzen kann entweder mit einer Anwendung namens "Netgenerate" oder durch den Import einer digitalen Straßenkarte mit "netconvert" erfolgen. Es gibt drei verschiedene Arten von abstrakten Straßennetzen: "manhattanähnliche" Netze, kreisförmige "Spinnennetz"-Netze und Zufallsnetze. Jeder der Generierungsalgorithmen verfügt über eine Reihe von Optionen zur Anpassung der Eigenschaften des Netzwerks. Die Abbildung 11 zeigt Beispiele von generierten Netzen.

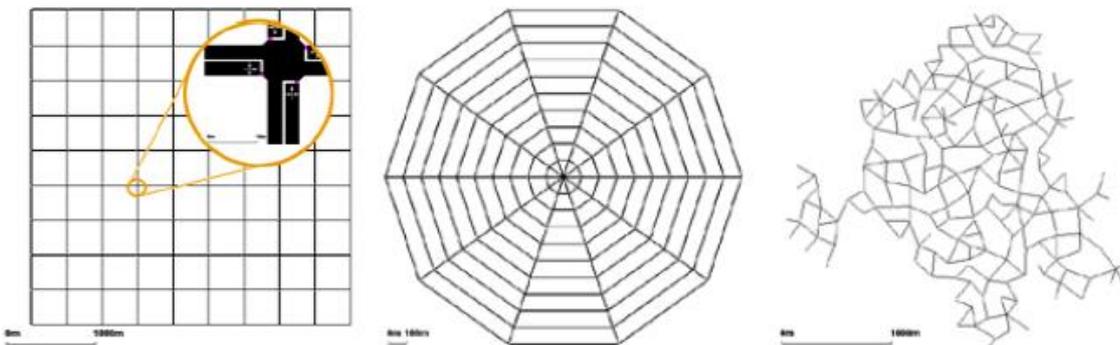


Abbildung 11: Beispiele für abstrakte Straßennetze, wie sie mit "Netgenerieren"; von links nach rechts: Gitter ("Manhattan", Spinne und zufällig Netzwerk)[10]

Grundlage jeder Simulation ist die Modellierung der Infrastruktur. SUMO-Netze bestehen aus Kanten, die Gleise oder Straßen und Knoten in Form von Bildern von Weichen, Bahnhöfen, Haltestellen und Bahnübergängen darstellen. Kantentypen sind Sätze von Standardkantenattributen, die durch nachträglich geladene Kanten referenziert werden können. Knoten beschreiben Bahnübergänge, Kanten beschreiben Straßenabschnitte. Verbindungen beschreiben, welche Fahrspuren, die in eine Kreuzung einfahren, mit welchen Fahrspuren, die die Kreuzung verlassen, verbunden sind. Kanten sind unidirektionale Verbindungen zwischen Kreuzungen, denen unterschiedliche Eigenschaften wie Geometrie, Höchstgeschwindigkeit und Informationen über zugelassene Fahrzeugtypen zugeordnet sind. Die Knoten enthalten Informationen über ihre Position und Form sowie über Prioritätsregeln, die von Signalsystemen umgangen werden können. In den Netzdateien des SUMO stehen Informationen zu Kanten, Knoten, Verbindungen und Signalplänen als XML-Dateien zur Verfügung. Bei unvollständigen Eingaben enthält das von Netconvert generierte Simulationsnetzwerk Werte, die heuristisch berechnet werden, und abgeleitete Werte wie die exakte Geometrie an Schnittpunkten.

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

Es ist auch möglich, ein Simulationsnetz wieder in das "normale" Format zu konvertieren. Mehrere Eingabeformate können gleichzeitig geladen und automatisch zusammengeführt werden.

Ein typischer Ansatz für Straßenverkehrssimulationen ist die Modellierung von Strecken mit unidirektionalen Kanten. Um die bidirektionale Praktikabilität insbesondere von eingleisigen Streckenabschnitten darzustellen, überlagert SUMO daher zwei Kanten mit genau entgegengesetzter Geometrie. Damit wird jedoch sichergestellt, dass zu jedem Zeitpunkt nur eine der beiden Kanten von einer Zugfahrt belegt werden kann.

Schieneverkehr ist neben der Schieneninfrastruktur der Leit- und Sicherungstechnik ein entscheidender Bestandteil, da sie für die Regelung und Sicherheit des Zugablaufs sorgt. Das Standardverfahren für die Steuerung der Zuglaufverfolgung im konventionellen Bahnbetrieb besteht darin, in einem festen Abstand zu fahren. Die Modellierung erfolgt in SUMO über Knoten vom Typ "Eisenbahnsignal", mit denen die Strecken wie in der Realität in Blockabschnitte unterteilt werden können. Auf diese Weise kann automatisch sichergestellt werden, dass in jedem Block maximal eine Zugfahrt durchgeführt werden kann. Darüber hinaus kann dieser Knotentyp auch zur Modellierung einfacher Routen verwendet werden, indem ein Weg zum Zielsignal gesucht und bei freier Strecke das Signal eingeschaltet wird. Bahnübergänge werden in SUMO ebenfalls als Knotenpunkte modelliert, die die Belegung des entsprechenden Blockabschnittes überprüfen und die Strecke für Straßenfahrzeuge entsprechend freigeben oder sperren.

Ursprünglich wurden die meisten der verfügbaren digitalen Straßennetze für Routingzwecke (Navigation) konzipiert. Daher fehlt ihnen oft der Detaillierungsgrad, den mikroskopische Straßenverkehrssimulationen benötigen: Die Anzahl der Fahrspuren, insbesondere vor Kreuzungen, Informationen darüber, welche Fahrspuren sich welchen aufeinanderfolgenden Fahrspuren nähern, Ampelpositionen und Karten usw. Durch die gemeinsame Nutzung derselben Bibliothek zur Vorbereitung von generierten/importierten Straßennetzen, wie in Abbildung 12 dargestellt, versuchen sowohl die Netzgenerierung als auch die Netzumwandlung, fehlende Werte mit Hilfe von Heuristiken zu ermitteln.

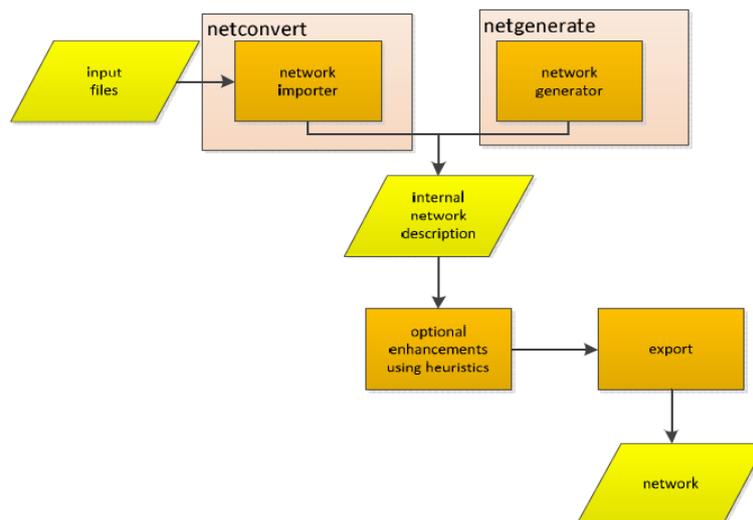


Abbildung 12: Gemeinsames Netzwerkvorbereitungsverfahren für die Netzgenerierung und die Netzumwandlung

4.1 Fahrzeuge und Linien

SUMO ist eine rein mikroskopische Verkehrssimulation, da jedes Fahrzeug individuell modelliert und explizit spezifiziert, mindestens durch eine eindeutige Kennung, die Abfahrtszeit und die Route des Fahrzeugs durch das Netz definiert ist. Der Begriff "Route" bezieht sich auf die vollständige Liste der verbundenen Kanten zwischen der Abfahrt eines Fahrzeugs und seinem Ziel. Wenn die Start- und Endigenschaften, wie die zu verwendende Fahrspur, die Geschwindigkeit oder die genaue Position an einer Kante, nicht verfügbar sind, ist die Strecke zu verwenden. Die individuellen Verkehrswege sind variabel und in SUMO z.B. aus Quell-Ziel-Matrizen oder anderen Verkehrsdaten generiert, so folgen die Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs vordefinierten Linien mit Haltestellen oder Stationen und Haltepunkten. Diese Informationen können manuell in SUMO erstellt oder, wenn verfügbar aus OSM-Daten oder anderen Quellen, importiert werden.

In SUMO werden die Fahrzeuge durch Fahrzeugklassen und -typen charakterisiert, die die physikalischen Eigenschaften des Fahrzeugs und die Variablen des verwendeten Bewegungsmodells beschreiben. Jedes Fahrzeug kann auch einer der verfügbaren Schadstoff- oder Geräuschemissionsklassen zugeordnet werden. Zusätzliche Variablen werden verwendet, um das Erscheinungsbild des Fahrzeugs in der grafischen Benutzeroberfläche der Simulation zu definieren. Eisenbahnfahrzeuge können den SUMO-Fahrzeugklassen "Schiene", "Elektroschiene", "Stadtbahn" oder "Straßenbahn" zugeordnet werden, die zur Festlegung der zulässigen Ränder dienen, insbesondere werden in diesem Fall die Eisenbahnstrecken definiert. Die Fahrzeugtypdefinition dient auch dazu, Eigenschaften wie Fahrzeuglänge und Höchstgeschwindigkeit, aber auch den Zugtyp und das folgende Fahrzeugmodell festzulegen.

4.2 Simulation

„Sumo“ führt eine zeitdiskrete Simulation durch. Die Standarddauer eines Schrittes beträgt eine Sekunde, kann aber auch niedriger eingestellt werden, bis zu einer Millisekunde. Intern wird die Zeit in Mikrosekunden angezeigt und als ganzzahlige Werte gespeichert.

Die maximale Dauer eines Szenarios ist daher an 49 Tage gebunden. Das Simulationsmodell ist im Raum durchgehend und intern wird die Position jedes Fahrzeugs durch die Fahrspur, auf der sich das Fahrzeug befindet, und den Abstand zum Anfang dieser Fahrspur beschrieben. Beim Fahren auf dem Netz wird die Geschwindigkeit jedes Fahrzeugs mit Hilfe eines so genannten Car-Tracking-Modells berechnet. Car-Tracking-Modelle berechnen im Allgemeinen die Geschwindigkeit eines zu untersuchenden Fahrzeugs (Ego), indem sie die Geschwindigkeit des Fahrzeugs, seinen Abstand zum führenden Fahrzeug (Fahrer) und die Geschwindigkeit des Fahrers berücksichtigen. Dies ermöglicht z.B. in Eisenbahnszenarien die Modellierung von speziellem Verhalten einzelner Fahrzeuge oder den Einbau von Fehlern. Die Ergebnisse der einzelnen Simulationsläufe können dann in XML-Dateien gespeichert und weiterverarbeitet werden. Neben den Fahrzeugpositionen zu jedem Zeitschritt können auch Verspätungen oder Fahrgastzahlen analysiert werden.

Im Unterschied zum Straßenverkehr wird der Verkehr auf dem Schienennetz durchgehend von Disponenten überwacht, die bei Störungen und möglichen Konflikten eingreifen, um den Betrieb zu steuern. Die Abbildung dieser komplexen Steuerungslogik erfordert eine weitere Ebene der Modellierung, die derzeit noch nicht Bestandteil von SUMO ist.

4.3 Implementierung von SUMO

In diesem Abschnitt wird das Programm Sumo in der Kreuzung in Wuppertal implantiert. Zunächst wird diese Kreuzung beschrieben und mit SUMO gezeichnet werden.

4.3.1 Kreuzung Robert-Daum-Platz

Der ehemalige Tannenberglplatz trägt heute den Namen des ersten DGB-Vorsitzenden und damaligen Oberbürgermeisters von Wuppertal, Robert Daum, der 1966 gestorben ist. Der Platz ist seit der Erweiterung des Talbodens in der Nachkriegszeit ein wichtiger Verkehrsknotenpunkt. Hier befinden sich die gleichnamige Schwebbahnhaltestelle, das GEFA-Hochhaus der Deutschen Bank und das Katholische Gymnasium West. Das imposante Schulgebäude war früher ein Realgymnasium für Knaben (Abbildung 13) [22].



Abbildung 13: Robert-Daum -Platz (Google Earth)

Die Bundesstraße 7 (B 7), Wuppertals wichtigste Ost-West-Achse, führt ostwärts über die Bundesallee in die Innenstadt, westwärts über die Friedrich-Ebert-Straße nach Vohwinkel und die Landesstraße 427 (L 427), eine Nord-Süd-Verbindung zur Innenstadt mit den Namen Tannenbergsstraße und Brillerstraße, kreuzt am Robert-Daum-Platz. Im Süden verläuft die Tannenbergsstraße und bildet die Verbindung zur Elberfelder Südstadt und später zum Stadtteil Cronenberg. Die Brillerstraße, die im Norden durch das Briller Viertel verläuft, ist die kürzeste Verbindung zur Bundesautobahn 46 (A 46) in Richtung Dortmund. In Richtung Düsseldorf auf der A 46 empfiehlt sich der umgekehrte Weg nach Süden (und damit verwirrend für ortsunkundige Autofahrer), der über den Kiesbergtunnel bis zum Sonnborner Kreuz und dann zügig auf die A 46 führt (Abbildung 14).

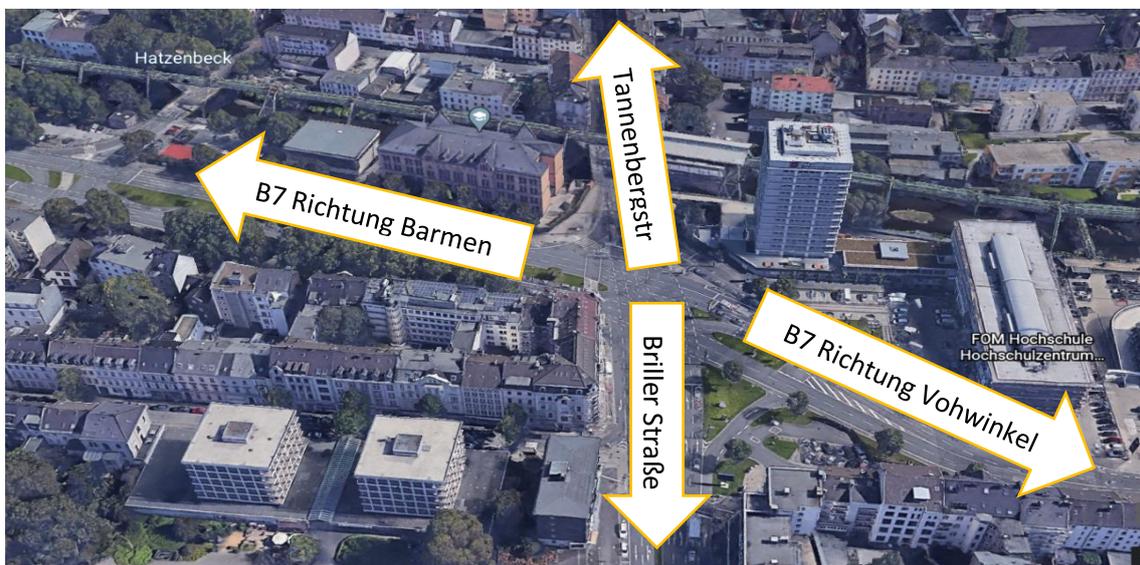


Abbildung 14: Beschreibung der Robert-Daum-Platz (Google Earth)

4.3.2 Openstreetmap

OpenStreetMap ist eine wertvolle Quelle für Kartendaten aus der realen Welt. Es ist nützlich für die Verkehrssimulation und diese Karte besteht darin, eine Karte zu erhalten, in der die Fahrzeuge fahren können und ist einfach in SUMO zu importieren. Die Vorgehensweise der OSM ist zunächst die Erstellung der Karte, dann die Umsetzung einer Edge Type Datei und schließlich die Generierung der SUMO-Netzdatei und Bearbeitung der Daten des Netzwerks.

Die folgende Abbildung zeigen in diesem Schritt die erstellte OpenStreetMap-Datei von der Kreuzung Robert-Daum-Platz in Wuppertal. Um einen Ausschnitt aus der OpenStreetMap zu erhalten, können die Exportfunktion aus der Webseite Openstreetmap.org verwendet werden. Damit können eine Auswahl von Objekten (normalerweise als rechteckiger Bereich angegeben) in einer Datei gespeichert werden: die OpenStreetMap-Datei. Nun sollte die Karte in OpenStreetMap die notwendige Qualität für ihre Simulation haben. Als nächstes sollten Sie den gewünschten Ausschnitt der Karte bestimmen und in eine OpenStreetMap-Datei exportieren (Abbildung 15).

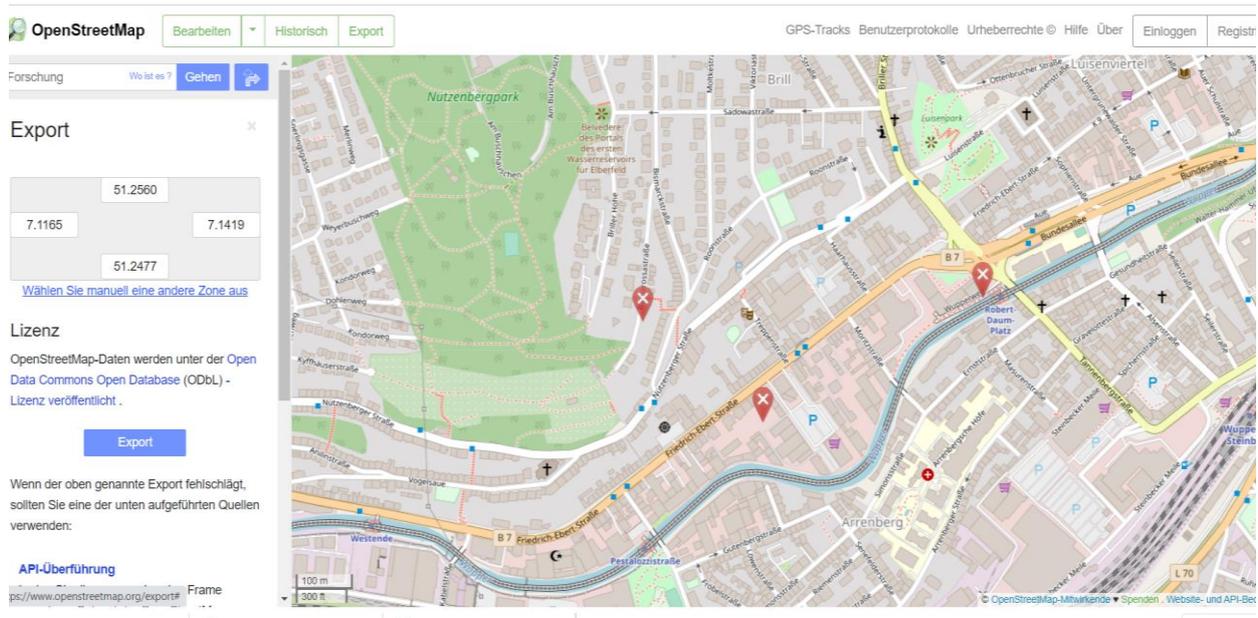


Abbildung 15: Robert-Daum-Platz mit Openstreetmap [23]

Während das OpenStreetMap-Format ein weit verbreitetes Format zur Beschreibung einer Karte ist, hat SUMO dafür ein eigenes Format: das SUMO-Netzformat. Folglich wird die OpenStreetMap-Datei in eine SUMO-Netzdatei konvertiert. Jetzt die Real-World-Karte im Sumo-Programm erhältlich und es müssen nur die Eigenschaften des Netzwerks bearbeitet werden. Es wird erst die Einstellung der Ampeln der Kreuzung und die Haltestelle der beiden Richtungen erstellt.

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

Die öffentlichen und privaten Verkehrsmittel und deren Fahrpläne werden in Sumo eingetragen. Hier wird die Geschwindigkeit, Länge und Breite jedes Verkehrsmittels angepasst. Die Abbildung zeigt den Robert- Daum-Platz im Programm Sumo, der für die Verkehrssimulation vorbereitet wurde (Abbildung 16).



Abbildung 16: Verkehrssimulation der Robert-Daum- Platz

4.4 Definition des Kreisverkehrs

Der Verkehr wird für einige Verkehrsteilnehmer*innen nicht wie an einer Ampelkreuzung unterbrochen, sondern auf einen Kreisverkehr gelenkt.

Die Fahrspur des Kreisverkehrs führt um eine zentrale Insel herum und fungiert als Einbahnstraße, die im Rechtsverkehr auf der linken Seite (gegen den Uhrzeigersinn) liegt. Wenn man in einem Land lebt, in dem Linksverkehr herrscht, befindet sich der Kreisverkehr auf der linken Seite (Rechtskurve) [24].

4.4.1 Vorteile eines Kreisverkehrs

Ein Kreisverkehr ist ein guter und übersichtlicher Verkehrsfluss, die Regeln sind einfach. Die Fahrrichtungen sind identisch und die Sicherheit für Linksabbieger*innen ist wesentlich höher. Die Wartezeiten verkürzen sich durch einen gleichmäßigen Verkehrsfluss, insbesondere in den Nebenverkehrszeiten. Durch eine unvermeidliche Geschwindigkeitsreduzierung im Zulauf wird auch die Aufmerksamkeit und damit die Verkehrssicherheit erhöht. Ein weiterer Vorteil sind niedrige Kosten, z.B. geringere Betriebs- und Wartungskosten und weniger verkehrliche Konfliktpunkte, damit geringere Verkehrsunfallzahlen bzw. geringere Schwere der Unfallfolgen, wie in folgender Abbildung 17 gezeigt [25].

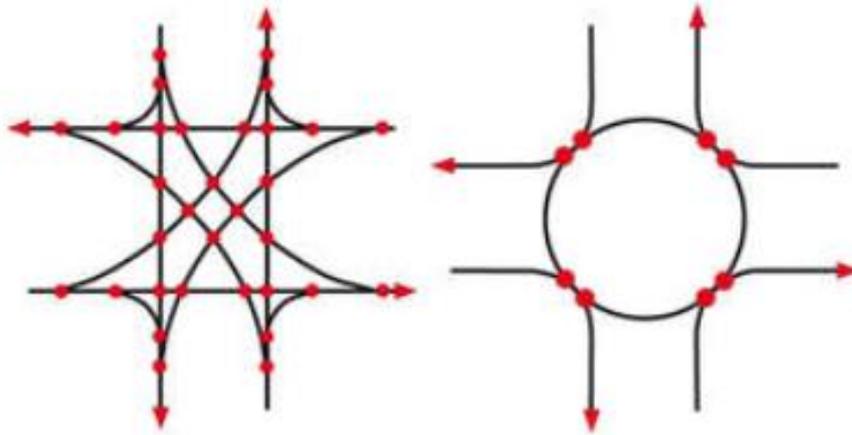


Abbildung 17: Konfliktpunkte einer Kreuzung [25]

4.4.2 Nachteile eines Kreisverkehrs

Der Platzbedarf bei einem Kreisverkehr ist im Vergleich zu einer normalen Straßenkreuzung viel größer. Aus diesem Grund können bestehende Ampelkreuzungen oft nicht in einen Kreisverkehr umgebaut werden. Darüber hinaus kann der Kreisverkehr eine Gefahr für Radfahrer*innen und Fußgänger*innen darstellen. Fußgänger*innen müssen eine längere Strecke überqueren, wenn es keine "Zebrastreifen" gibt, wissen sie in der Regel nicht, wie sie sich verhalten sollen. Auch der Radverkehr lässt sich nur schwer lenken, wenn separate Radwege erforderlich sind. Um Konfliktsituationen zu vermeiden und die Verkehrssicherheit zu erhöhen, werden Radwege deshalb oft vor dem Kreisverkehr beendet und in den normalen Verkehrsfluss integriert.

Das Unfallrisiko kann höher sein, insbesondere an stark frequentierten Kreisverkehren. An den Eingängen stehen oft lange Schlangen, was häufig zu Fehleinschätzungen der Fahrer*innen aufgrund von Zeitdruck oder Ungeduld führt. Hochfrequentierte Kreisverkehre sind unfallanfälliger, da die Kreuzungen mit hohem Risiko befahren werden (Lücken risikoreich genutzt). Um dies zu vermeiden, ist die Einfahrt zu einigen Kreisverkehren durch Ampeln geregelt [26].

4.5 Definition einer Lichtsignalanlage

Eine Lichtsignalanlage ist eine Verkehrsbeeinflussungsanlage an Kreuzungen oder Gefahrenstellen, wie z.B. stark frequentierten Fußgängerüberwegen, Feuerwehrezufahrten, Engpässen oder Straßenbahnübergängen. Die Signalgeber, die "Ampeln", sind ein für den Verkehrsteilnehmer sichtbares Grundelement. Sie sind auf unterschiedliche Weise konzipiert. Bei Kraftfahrzeugen haben sie in der Regel drei Felder im klassischen rot-gelb-grünen Farbschema. Es gibt aber auch

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal zweifelhafte Muster (rot-gelb; gelb-grün) und sogar Einzelfeldmuster (rot; grün), die ein besonderes Signal verwenden. Für Fußgänger*innen werden die Signalgeber in der Regel mit zwei Feldern (rot-grün) ausgeführt. Die folgende Abbildung zeigt, wie die Ampel funktioniert: Mittels eines Steuergeräts, das das Signal für die Ampel gibt und die Angaben in Farbe (rot, gelb oder grün) anzeigt (Krimmling, 2017).

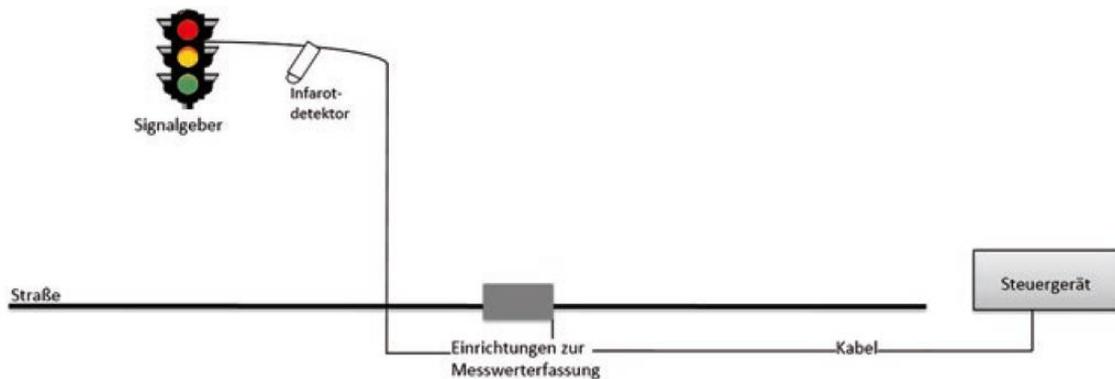


Abbildung 18: Skizze einer Lichtsignalanlage (Krimmling, 2017)

4.5.1 Vorteile und Nachteile einer Lichtsignalanlage

Verkehrssignale wurden schon immer an gefährlichen Orten und an Bahnübergängen installiert, um die Sicherheit aller zu gewährleisten. Insbesondere Ampeln für Fußgänger*innen werden oft ignoriert. Das Lichtsignalsystem benötigt weniger Platz. Auch für Fußgänger*innen und Radfahrer*innen ist es einfacher, die Straße innerhalb des Kontobereichs zu überqueren. Ein Ampelsystem hilft, den Verkehrsfluss zu koordinieren, außerdem soll neben dem Verkehr auch der öffentliche Verkehr beschleunigt werden. Mit einer geringen Verkehrsbelastung aus den Nebenrichtungen ist ein reibungsloser und regelmäßiger Verkehrsfluss möglich. Im Gegensatz zu einem Kreisverkehr hat das Ampelsystem geringere Wartungs- und Betriebskosten. Beim Umbau eines Knotens ist zu berücksichtigen, dass das Unfallrisiko für alle Verkehrsteilnehmer*innen in diesem Fall geringer ist [27].

5. Szenario, Simulation und Analyse

Diese Arbeit soll dazu dienen, die bereits beschriebenen Simulationen und Konzepte zu prüfen. Hierfür wird ein Szenario implementiert, das die beschriebenen Komponenten nutzt und in einer stabilen Simulationsumgebung durchlaufen soll. Im Zuge der Konzeptionierung und Implementierung dieses Szenarios sollen Unzulänglichkeiten, Fehler und sinnvolle Ergänzungen der Komponenten ermittelt und aufgezeigt werden, ob die entwickelten Komponenten von Sumo in der ihnen zugedachten Art und Weise Verwendung finden können bzw. ob es Möglichkeiten zur Verbesserung gibt.

Hierzu ist es zuerst notwendig, das vorgegebene Szenario zu analysieren, was im folgenden Unterkapitel Szenario-Beschreibung vorliegt. Danach wird das Szenario neu in Sumo implementiert, wobei die beschriebenen Daten die Verkehrsnetze und Verkehrsteilnehmer*innen finden sollen. Die Implementierung bzw. Simulation untergliedert sich in verschiedene Phasen: So muss erst ein konzeptioneller Entwurf (Network.Sumo) erstellt, dann eine Konfigurationsdatei Verkehrsnetze und Teilnehmer*innen (Demand) erstellen und darauf aufbauend das Programm mit dem Simulationswerkzeug (Sumo.GUI) implementiert werden. Abschließend erfolgt eine Test- und Evaluierungsphase, in der die Ergebnisse der Simulationen in einer Tabelle gegenübergestellt werden können.

5.1 Beschreibung der Szenarios

Die Szenarios werden in drei Unterkapiteln beschrieben. In diesen drei Kapiteln sollen alle Kombinationen abgebildet werden, die in der realen Welt vorkommen können bzw. für diese Arbeit relevant sind.

Zum einen soll eine Simulation zeigen, wie die Situation auf der Straße mit einer Spur verläuft, wenn Ampeln zur Verfügung stehen würden.

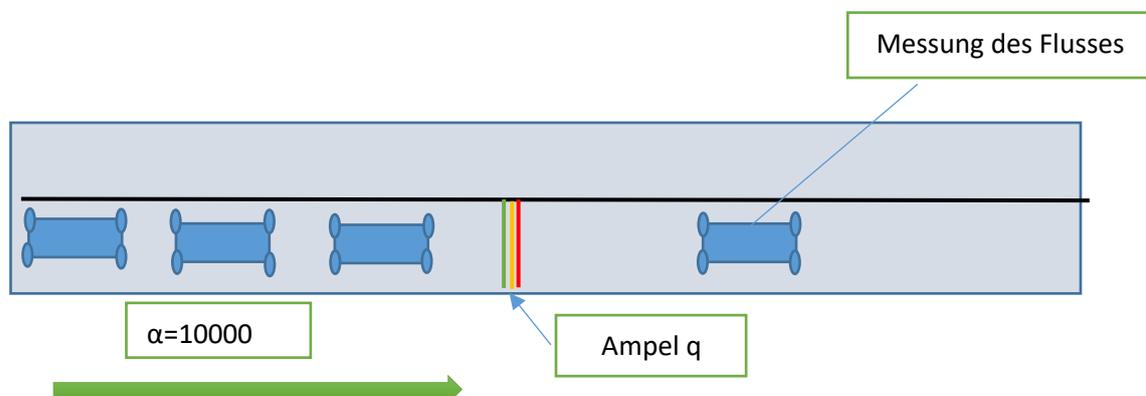


Abbildung 19: Darstellung Szenario 1

Eine andere Simulation soll zeigen, wie der Verkehrsfluss aussieht, wenn ein Teilnehmer auf eine Straße mit einer Spur, dann einen Kreisverkehr und schließlich einer Ampel trifft. Hierbei sind wiederum zwei Aspekte vorgestellt: Einerseits müssen die Fahrzeugführer*innen die vollständige Strecke bis zur Ampel verfolgen und erst weiterfahren, wenn die Ampel grün ist, und andererseits können sie im Kreisverkehr nicht umkehren.

Die dritte Simulation zeigt zwar die gleiche Situation, jedoch können die Teilnehmer*innen mehr Strecke durchfahren, was bedeutet, dass die Fahrzeuge im Kreisverkehr umdrehen können. Auch hier müssen die Fahrzeugführer die ganze Strecke durchfahren. Entweder mit direkter Strecke oder umgekehrter Strecke bis zur Ampelreglung, dann halten und bei einer grünen Ampel weiterfahren. Alternativ sind die Parameter der Verkehrsteilnehmer*innen und Verkehrsnetzen für die jeglichen Szenarios unter unterschiedliche Zeiträumen „q“ der Ampeln mit dem Sumo-Programm eingestellt und werden durch jede Beschreibung in einer Tabelle dargestellt. Zur Bestimmung des Zeitraums „q“ wird diese Gleichung verwendet:

$$q = \frac{\text{Dauer der grünen Phase}}{\text{Dauer der Grünen Phase} + \text{dauer der rotenPhase}}, \quad q \in [0..1] \quad (5.1)$$

q=0 immer Rot

q=1 immer grün

Die Dauer der Grün-Phase und Rot-Phase wird in allen Szenarios um 100s geschätzt und werden sich proportionell mit 10s verändern. Zudem wird die Simulation von „q=0,1“ (Nur 10s Grün-Phase) bis zu „q=1“ (kein Rot-Phase vorhanden) eingeführt.

5.1.1 Szenario 1 (1-Spur mit Ampel)

Das erste Szenario wurde zuerst auf Sumo schematisiert. Die Straße stellt eine einzelne Spur mit einer Länge von 500m dar. Am Ende treffen die Verkehrsteilnehmer*innen auf eine Ampel. Die Abbildung 20 zeigt die Skizzierung dieses Szenarios mit dem Programm Sumo.

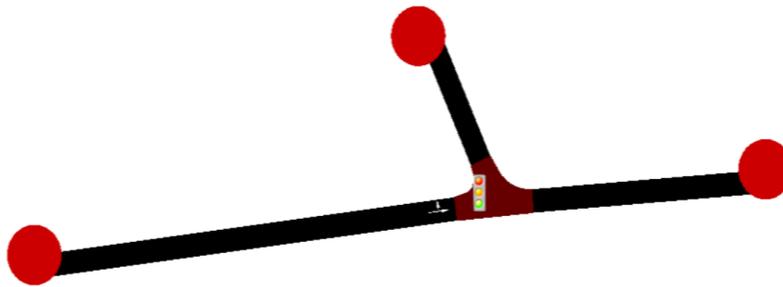


Abbildung 20:Skizzierung mit Sumo -1-Spur mit Ampel-

Nach der Skizzierung des Szenarios mit SUMO werden die Parameter der Verkehrsnachfrage festgelegt. In der Tabelle 5 sind die Angaben der Parameter für jede*n Verkehrsteilnehmer*in über die Zeit in dem ganzen Verkehrsnetz dargestellt. Die maximale Fahrzeuganzahl liegt bei ca. „10000 Fahrzeugen“. Die vollständige Berechnung befindet sich im Anhang 1.

Tabelle 5: Parameter des ersten Szenarios

Anzahl der Teilnehmer*innen	10000 Fahrzeuge
Geschwindigkeit	50km/h
Länge	500m
q(rot) + q(grüne)	100s
Zeitlücke	2 s
Probabilität (Anzahl der Verkehr pro S)	0,5

5.1.2 Ergebnisse des ersten Szenarios:

Im Rahmen der Simulationsbetrachtung werden die sich in der Tabelle im Anhang befindenden resultierenden Ergebnisse dargestellt. Daher werden die Ermittlungen des Verkehrsflusses in Abhängigkeit vom Zeitraum der Ampeln abgebildet. Dieser steigt linear über die Anzahl der durchgeführten Fahrzeuge pro 1 Stunde (Abbildung 21), je länger Zeit „q“ desto größer der Verkehrsfluss.

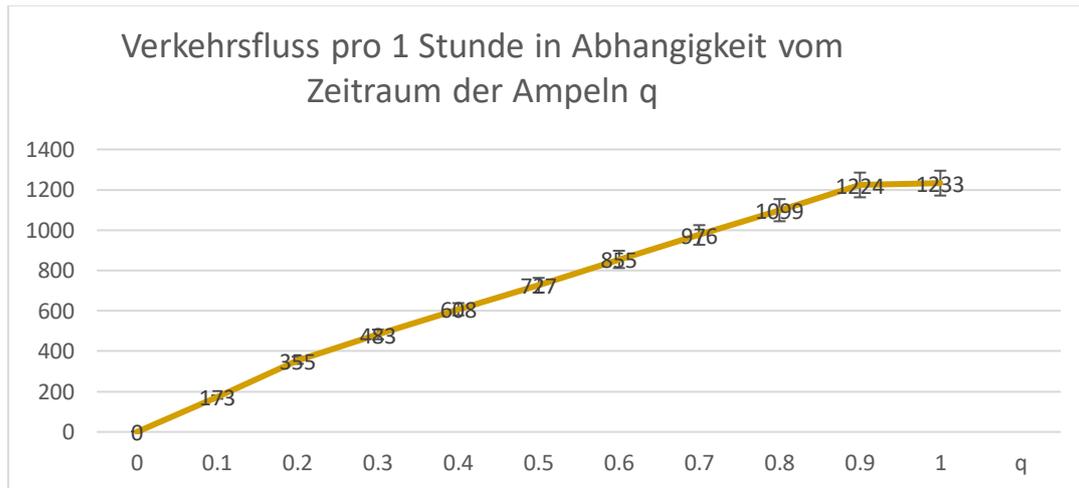


Abbildung 21: Verkehrsfluss pro 1 Stunde in Abhängigkeit vom Zeitraum der Ampel q

5.1.3 Szenario 2 (Kreisverkehr mit Ampel)

Die theoretische Ausgangssituation des zweiten Szenarios wäre, dass in der Simulationsumgebung ein Kreisverkehr und 100 m nach Ausfahrt eine Ampel angelegt sind. Kreisverkehre haben im Allgemeinen eine höhere Leistungsfähigkeit als plangleiche vorfahrtgeregeltete Knotenpunkte und Knotenpunkte mit Lichtsignalregelung.

Höhere Verkehrsbelastungen erfordern entweder eine Signalregelung oder einen Kreisverkehr. Bis zu einem Verkehrsaufkommen von 20.000 bis 25.000 Kfz/Tag ist je nach Verteilung der Verkehrsströme der Kreisverkehr ein mit Abbiegestreifen ausgebauter signalisierter Knotenpunkt zu überlegen. In diesem Szenario werden ein kleiner Kreisverkehr und jede Ausfahrt mit einer Spur eingenommen. Für die Erstellung der Software-Implementierung auf Sumo wird ein Verfahren verwendet, das einen gegebenen Kreisabschnitt durch eine möglichst gut approximierten Kurve ersetzt: Gegeben seien Mittelpunkt, Außerdurchmesser und die Kapazität des Kreises.

Laut der Abbildung 22 wird von einem kleinen Kreisverkehr mit einem Außerdurchmesser von 30m und einer Kapazität von 12000 bis 26000 Fahrzeuge pro Tag ausgegangen.

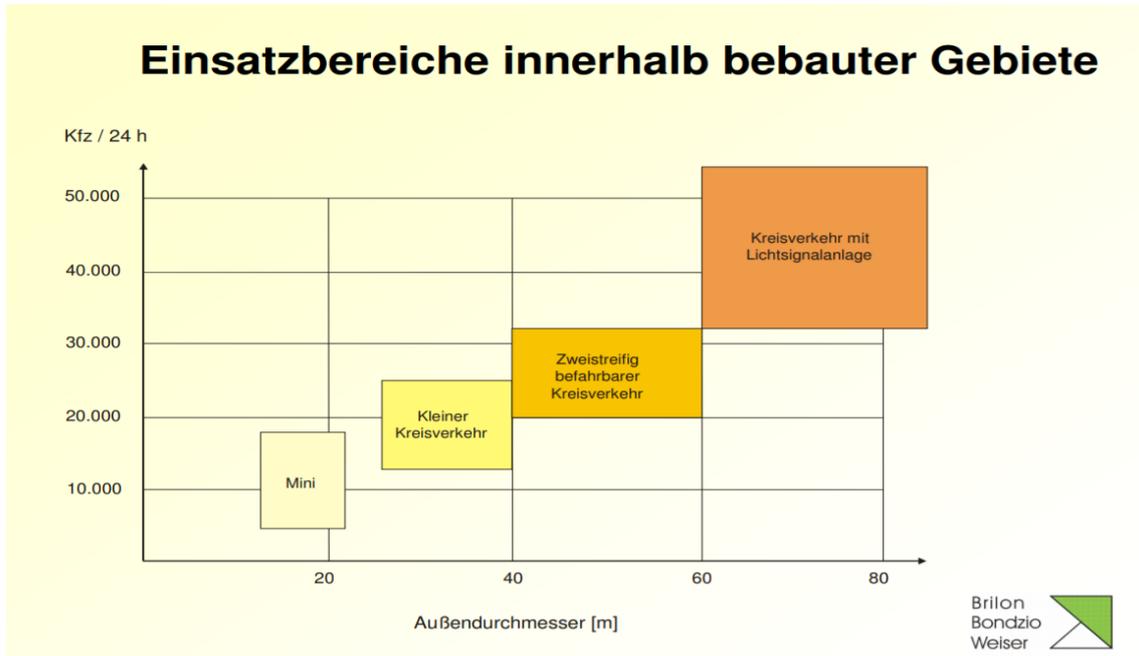


Abbildung 22: Einsatzbereiche der Kreisverkehre (Außerdurchmesser/Kapazität) [28]

Dieses Szenario besteht daraus, den Verkehr ständig in Bewegung zu halten und einen gleichmäßigen Verkehrsablauf zu ermöglichen. Da schon kleine Lücken im Verkehrsfluss zum Einfahren und keine Rückkehr in den Kreis genutzt werden, treten für die Verkehrsteilnehmer*innen bei geringen und mittleren Verkehrsstärken, aber auch zu Spitzenverkehrszeiten, keine oder nur kurze Wartezeiten auf.

Die Abbildung 23 zeigt die theoretische Ausgangssituation des Szenarios. „ α_1 “ und „ α_2 “ sind die Verkehrsflüsse jeder Richtung. Nach der Ausfahrt des Kreisverkehrs trifft jeder Verkehrsteilnehmer eine Ampel „ q_1 “ und „ q_2 “. Damit wird der Fluss „ F_1 “ und „ F_2 “ bestimmt.

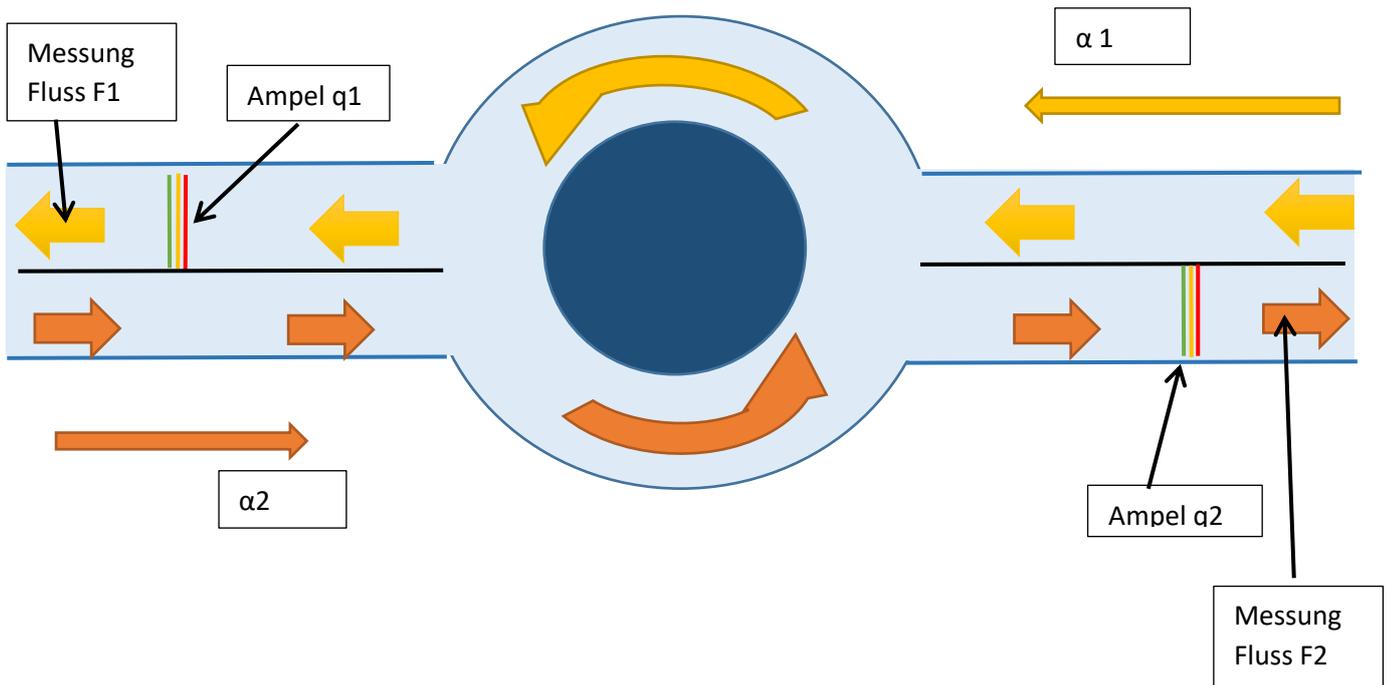


Abbildung 23: Verkehrsverhalten in Szenario 2

Die angenommenen Parameter werden in der Simulation in Sumo, wie im Abbildung 24 dargestellt ist, für 10000 Fahrzeuge für jeden Verkehrsfluss verwendet. Um repräsentative Werte zu erhalten, wurden zehn Simulationen von der Variation der Ampelphase durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationen befinden sich im Anhang 4. In dem genannten Anhang ist eine Tabelle mit der Bestimmung der F1 und F2 in verschiedenen Phasen. Im Folgenden werden die Ergebnisse auf dem Diagramm für die verschiedenen Phasen vorgestellt.

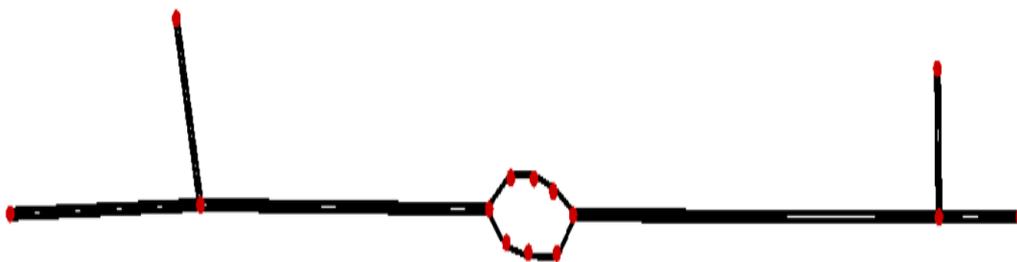


Abbildung 24: Skizzierung mit Sumo (1Spur-Kreisverkehr)

5.1.4 Ergebnisse des zweiten Szenarios

Alle oben genannten Spezifikationen wurden zur Erstellung einer SUMO Gui-Datei entworfen. Diese Datei enthält die Ergebnisse für die Verkehrsflüsse F1 und F2 und den Zeitraum für die Vervollständigung der Zahl der Verkehrsteilnehmer*innen. Tabelle 2 zeigt die Werte bei $q_1=q_2$. Es wird davon ausgegangen, dass die Verkehrsflüsse von der Dauer der Grünphase abhängen. In der Tabelle 6 werden niedrige Werte des Verkehrsflusses dargestellt, wenn q_1 nur zehn Sekunden beträgt, der höchste Verkehrsfluss entsteht, wenn $q=100$ Sekunden, d.h. wenn während der Simulation keine Rotphase auftritt. Zudem wird der Zeitraum T aufgeführt, d.h. die benötigte Zeit, um die Anzahl der Verkehrsteilnehmer*innen zu erreichen. Je niedriger q vorhanden ist, desto länger wird der Zeitraum. Z.B. wenn $q=10$ sec ist, sodass $T= 222917$ Sec benötigt wird, um die Anzahl zu vervollständigen.

Tabelle 6: Ergebnisse des Szenarios 2

q1	q2	F1	F2	T
0.1	0.1	153	153	222917
0.2	0.2	340	340	100992
0.3	0.3	492	492	70221
0.4	0.4	619	619	56427
0.5	0.5	727	727	47729
0.6	0.6	845	845	41251
0.7	0.7	966	966	36164
0.8	0.8	1118	1118	32419
0.9	0.9	1161	1161	30227
1	1	1163	1163	30196

5.2 Ermittlung einer Allgemeinen Kreuzung

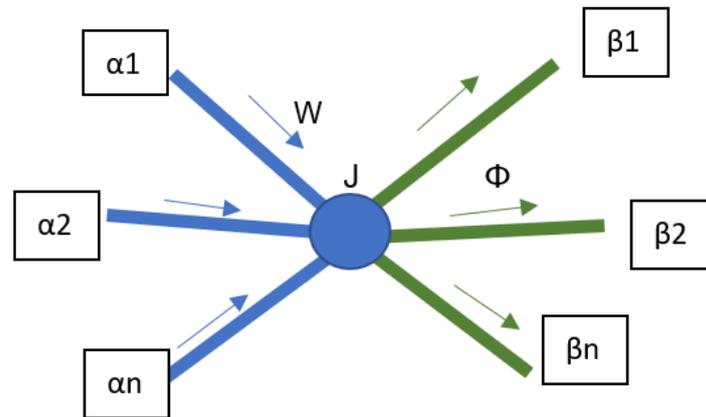


Abbildung 25: Hauptmakroskopische Variable einer Kreuzung

In dem vorherigen Abschnitt wird davon ausgegangen, dass zum Zeitpunkt „t“ keine Rotationsprozentätze angegeben sind. Vielmehr werden sie aus den Zielvorgaben der zum Zeitpunkt „t“ bei jeder Abweigung fahrbereiten Fahrzeuge und Informationen über die zum Zeitpunkt des Erreichens dieser Zielvorgaben am besten verfügbaren Routen abgeleitet.

Die Abbildung 25 zeigt eine allgemeine Kreuzung mit „n“ Ein- und Ausfahrt. Auf diese Weise werden die makroskopischen Variablen (in Übereinstimmung mit der Analyse in den vorhergehenden Abschnitten) verwendet, um Fahrzeuge zu identifizieren, die sich vorwärts bewegen. Es wird angenommen, dass die beste Routeninformation die Form der konstanten Routenauswahl ist, die für die beiden Endzellen jeder Abzweigung definiert ist „ $\alpha(i,j)$ “ und „ $\beta(i,j)$ “.

$\alpha(i)$, Kapazität in Ankunft [Fahrzeug/Stunde]

$\beta(i)$, Kapazität in Angebot [Fahrzeug/Stunde]

$\varphi(i)$, $w(j)$: Verkehrsflüsse auf jeder Strecke [Fahrzeug/Stunde]

$$\left\{ \begin{array}{l} W(i) \leq \alpha(i) \dots\dots\dots i \in N \\ \varphi(j) \leq \beta(j) \dots\dots\dots j \in N \end{array} \right.$$

$$J = \sum_{i=1}^n w(i) = \sum_{j=1}^n \varphi(i) \quad (5-2)$$

Sie geben den Anteil der Zielfahrzeuge „P“ an, die rechtzeitig von J zu jeder der beiden Endzellen vorrücken würden. Diese Konstante kann wie die folgende Formel berechnet werden und zwischen 0 und 1 liegen :

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ij}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (5-3)$$

P: Anteil der Fahrzeuge im Kreisverkehr

5.2.1 Implantierung des Szenarios 3

Nach der Bestimmung der allgemeinen Kreuzung wird in diesem Abschnitt das Szenario 3 umgesetzt. Dieses Szenario ist ein Kreisverkehr, zu dem zwei Straßen einzufahren und zwei Straßen auszufahren sind. Die Abbildung 9 zeigt die theoretische Ausgangssituation für das dritte Szenario. „ α 1.1“ und „ α 2.1“ sind die Verkehrsströme des Hauptstroms und „ α 1.2“ und „ α 2.2“ sind die Verkehrsströme der Abbieger*innen, die sich nicht im Hauptstrom befinden. Die Anzahl der Verkehrsteilnehmer*innen in Hauptströmen sind 5000 Fahrzeuge pro Strecke, dass bedeutet „ α 1.2= 2000“ Fahrzeuge und „ α 2.2= 2000“ Fahrzeuge. Der Anteil der Fahrzeuge beträgt laut der vorgegangenen Formel:

$$P(\alpha_1,i)=P(\alpha_2,i)=\frac{5000+2000}{5000+2000+5000+2000} = 0,5. \quad (5-4)$$

Nach Verlassen des Kreisverkehrs trifft jeder Verkehrsteilnehmer auf eine Ampel q1 und q2, sodass dadurch die Ströme F1.1 und F2.1 der Hauptstrom und die Ströme F2.1 und F2.2 der Nicht-Hauptstrom bestimmt werden. Die Abmessungen des Kreisverkehrs bleiben identisch zu denen in Szenario 2.

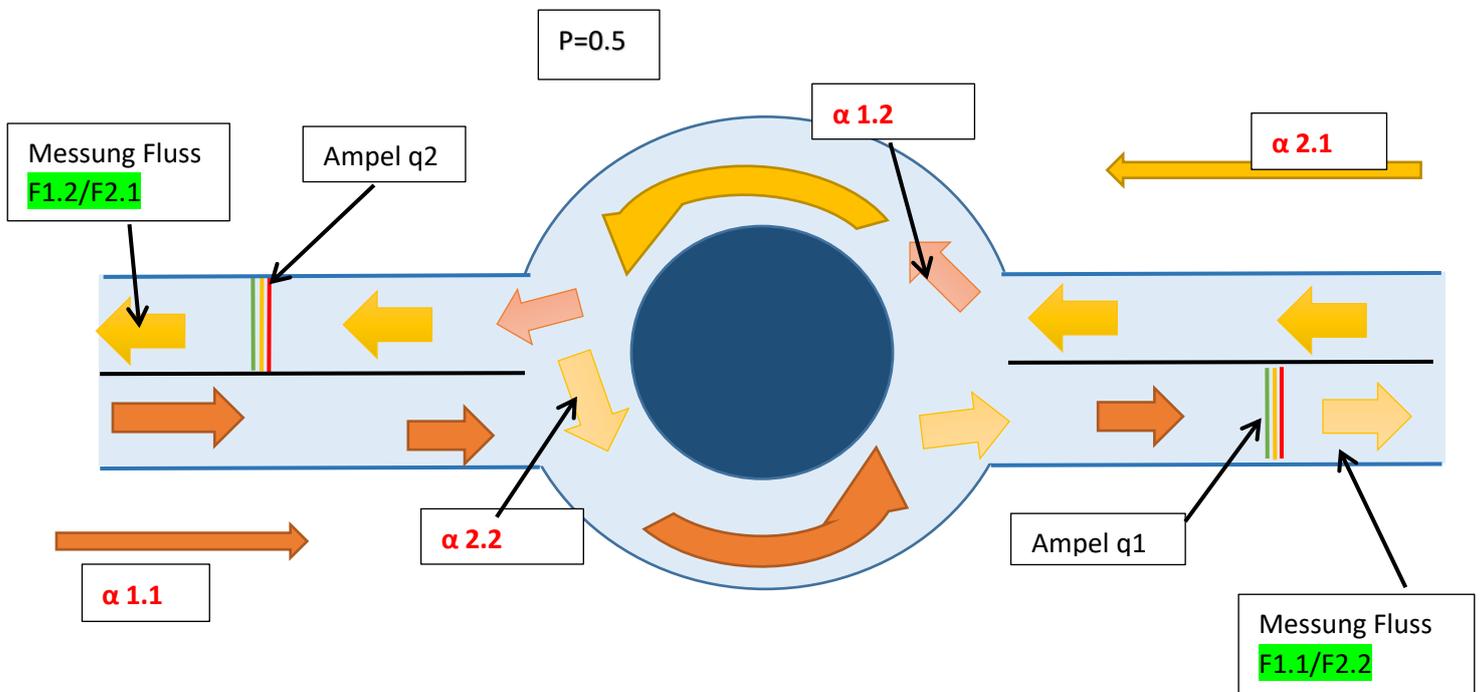


Abbildung 26: Verkehrsverhalten in Szenario 3

5.2.2 Ergebnisse des dritten Szenarios

Die durchgeführten makroskopischen Verkehrssimulationen ermöglichten es, die Erfassung des Verhaltens des Verkehrsteilnehmers auf dem Netz in Bezug auf die mikroskopischen Daten abzuschätzen.

Die Ergebnisse sind jedoch von verschiedenen Annahmen abhängig und können daher nicht einzeln in die Praxis umgesetzt werden. Die Datenbanken der Simulationsszenarien basieren auf einem bereits existierenden Szenario 2, das die Verkehrsströme durch einen Kreisverkehr mit Haupt- und Abbiegerverkehrsströmen umfasst. Die bestimmten Werte der unterschiedlichen Verkehrsflüsse befinden sich auf der Tabelle 3 im Anhang 4. Die Verkehrsflüsse sind abhängig von der Zeitdauer der Phase 1 und Phase 2.

Nach der Bestimmung der Verkehrsflüsse wird die Formel FIFO verwendet, um die mikroskopischen Werte abzuschätzen und mit den Sumo-Werten zu vergleichen:

$$J1_{\text{-FIFO}} = \min \left\{ \left(\sum_{i=1}^n \alpha(i) \right), \left(\frac{\beta(i,w)}{P} \right), \left(\frac{\beta(j,\varphi)}{1-P} \right) \right\} \quad (5-5)$$

$$J1_{\text{-FIFO}} = \min \left\{ 14000, \left(\frac{F1,1, F1,2}{0.5} \right), \left(\frac{F2,1, F2,2}{0.5} \right) \right\} \quad (5-6)$$

Die folgende Abbildung 27 zeigt ein Diagramm des Verhaltens der SUMO-Modelle (rot) im Vergleich zu den FIFO-Modellen (schwarz). Die berechneten Werte des FIFO- und SUMO-Modells sind in Anhang 5 von Tabelle 4 dargestellt. Das Diagramm zeigt zu Beginn einen deutlichen Abstand zwischen den beiden Kurven, d.h. wenn q als 0,1 bis 0,4 betrachtet wird, dann ist eine Annäherung zwischen 0,4 und 0,7 angegeben. Weiterhin sind die Ergebnisse wiederum mit einer kleinen Lücke markiert, wenn q als 0,8 bis 1 betrachtet wird.

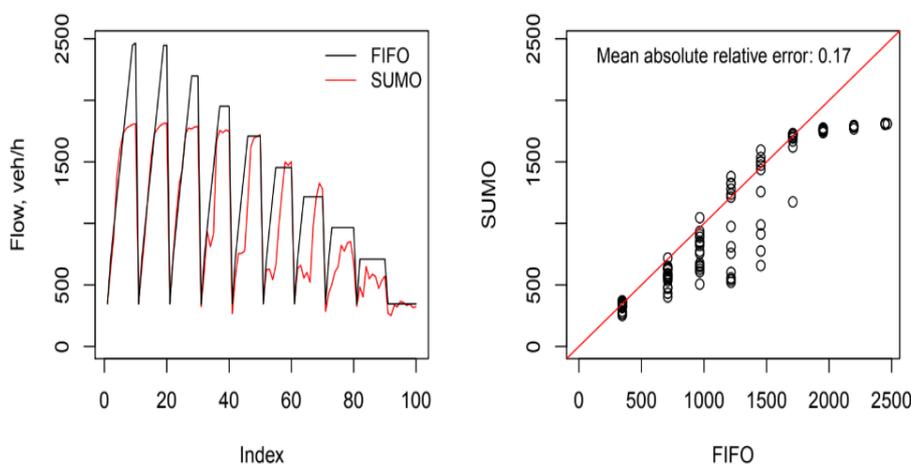


Abbildung 27: Vergleich der Ergebnisse J1-FIFO mit SUMO

Die Tabelle 7 zeigt die spezifischen Werte von q_1 und q_2 , die einen wesentlichen Abstand zwischen dem SUMO-Modell und dem FIFO-Modell aufweisen. Es wird davon ausgegangen, dass die Ergebnisse der Verkehrsströme, ob sie nun in den Hauptströmen liegen oder nicht, einen großen Einfluss auf diesen Abstand haben. Sie sind im Hinblick auf die Verkehrsperiode etwas gering. Z.B., wenn $q_1=0.4$ und $q_2=0.6$ sind, kann man einen deutlichen Abstand zwischen den beiden Modellen (SUMO=522 und FIFO= 1216) erkennen. Dies ist auf die Sperrung von Verkehrsteilnehmer*innen an Kreisverkehren aufgrund der Kapazität einer Fahrspur zurückzuführen. In der Simulation ist es möglich, dass das Verhalten der Verkehrsteilnehmer*innen zusammenbricht. Dieser Zusammenbruch hängt von der Vorfahrt des Kreisverkehrs ab, insbesondere wenn sich die Hauptströme und die Nicht-Hauptströme in Kreuzungen treffen, dann wird der linke zuerst ausgeführt und der rechte wartet, bis der linke leer wird. Ein Beispiel:

α 1.1, α 1.2 muss auf α 2.2, α 2.1 warten, gleichzeitig muss α 2.1 und α 2.2 auf α 1.2 warten, da der Zeitpunkt des Eintreffens in die Kreuzung eine große Rolle für die Ergebnisse der Verkehrsflüsse spielt.

Tabelle 7: Ergebnisse der FIFO und SUMO

q_1	q_2	F1.1	F1.2	F2.1	F2.2	SUMO	FIFO
0.6	0.4	223	88	320	126	757	1216
0.6	0.5	225	101	323	127	776	1454
0.6	0.6	414	165	427	169	1175	1710
0.4	0.4	202	79	198	78	557	1216
0.4	0.5	238	93	194	77	602	1216
0.4	0.6	238	91	138	55	522	1216

Darüber hinaus ist für weitere Schritte ein Vergleich zwischen dem mikroskopischen Modell SUMO mit dem makroskopische Modell FIFO empfehlenswert. Dies würde nicht nur zu einer genaueren makroskopischen Modellierung beitragen, sondern auch dazu, die maximale Kapazität K des Kreisverkehrs in FIFO Formel (es gibt z.B. nur eine Spur) abzuschätzen. Die maximale Kapazität K wird mit Hilfe der Simulationen von SUMO $K=1814$ Fahrzeuge/Stunde genommen und daraus folgend wäre ein realistischeres FIFO-Modell:

$$J2_{\text{-FIFO}} = \min \left\{ \left(\sum_{i=1}^n \alpha(i) \right), \left(\frac{\beta(i,w)}{p} \right), \left(\frac{\beta(j,\varphi)}{1-p} \right), K \right\} \quad (5-7)$$

$$J2_{\text{-FIFO}} = \min \left\{ 14000, \left(\frac{F1,1, F2,1}{0.5} \right), \left(\frac{F2,1, F2,2}{0.5} \right), 1814 \right\} \quad (5-8)$$

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

Nach der vorhergehenden Formel kann die Gesamtsumme der Fahrzeugströme vernachlässigt werden, so ist es möglich das Minimum zwischen der Kapazität und den Formeln zu ermitteln.

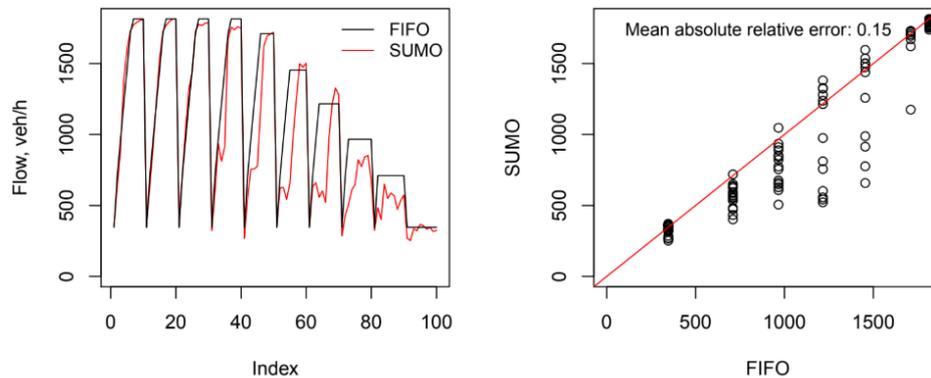


Abbildung 28: Vergleich der Ergebnisse J2 FIFO mit SUMO

Die Abbildung 28 zeigt ein neuartiges Diagramm nach der entsprechenden Formel, es enthält eine kleine Annäherung zwischen FIFO und SUMO. Der geschätzte Fehler gemäß dem Diagramm beträgt 15%. Dieser Fehler hängt von mehreren Einflussfaktoren ab, wie z.B. der Startzeit für die Wahl der Strecke, der Stau, die Anzahl der Fahrzeuge, Sperrung im Kreisverkehr zwischen den Abbiegern und Hauptströmen sowie der Verkehrsteilnehmer*innen usw.

6. Fazit & Ausblick

Die wachsende Zahl von Individualfahrzeugen hat zu einer starken Zunahme des Verkehrs- und der Umweltbelastungen sowie zu einer verstärkten Nutzung von öffentlichen Parkplätzen geführt. Die Nutzung des Privatfahrzeugs als Hauptverkehrsmittel konzentriert sich hauptsächlich auf ländliche- und Randzonen. Diese Situation ist vor allem auf die Ineffizienz der öffentlichen Verkehrsdienste zurückzuführen, die von langen, indirekten Strecken, lange Warte- und Reisezeiten, begrenzte Fahrpläne und geringe Taktfrequenz gekennzeichnet sind. In der Studienarbeit wurde die Kapazität C einer Kreuzung am Beispiel des Robert-Daum-Platz in Wuppertal ermittelt.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein Vergleich zwischen makroskopischen Modellen und mikroskopischen Modellen als Bewertung der vorhandenen Verkehrsbelastung mittels Verkehrssimulationen untersucht. Der Vergleich wird durch drei Szenarien mit unterschiedlichen Anforderungen eingeleitet und durch die Interpretation von FIFO-Modellen und SUMO-Werten ausgewertet.

Die Simulationsergebnisse zeigen das große Potential und die Vorteile zwischen den beiden Modellen, obwohl eine Annäherung vorhanden ist. Diese Lücke wird durch verschiedene Faktoren wie Verkehrsaufkommen, Reisezeit, unterschiedliche Geschwindigkeit, Abstandslücke, Zeitlücke usw. ausgedrückt. Gemäß der Simulation ergibt sich ein größerer Einfluss durch den Stau im Kreisverkehr, insbesondere durch den Konflikt im Knotenpunkt zwischen den Hauptströmen und den Abbiegungen.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Realität der Stauprognosen nicht erreicht wurde, aber einer der Teilschritte erreicht ist. Es wurden die Werte der mikroskopischen und makroskopischen Modelle gefunden, mit denen die Daten ausgewertet und verglichen werden können. Um ein reales Szenario zu erkennen, ist es notwendig, das gesamte Straßennetz zu modellieren, d.h. die Simulation ist nicht auf Fahrzeuge beschränkt, sondern es müssen auch Lkw, Fußgänger*innen und Busse erfasst werden. Dies muss irgendwie hinzugefügt werden, entweder automatisch mit OpenStreetMap oder manuell auf SUMO (Demand).

Das Ziel von Verkehrssimulationen ist es, Erkenntnisse über reale oder fiktive Verkehrssituationen zu gewinnen, neue Verfahren und Konzepte zu analysieren und reproduzierbare Untersuchungen durchzuführen. SUMO ist eine geeignete Grundlage für die Umsetzung von Simulationen, da es sich um eine offene Plattform handelt, die je nach Anwendungsfall flexibel erweitert werden kann, um zukünftige Fragen zu weiteren Projekten mit einzubeziehen.

Die derzeitige verwendete Methode ist die Ermittlung von Verkehrsflüssen mit unterschiedlichen Anforderungen mittels SUMO-Simulation. Die technologischen Entwicklungen deuten jedoch darauf

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal
hin, dass die Bestimmung der Verkehrsströme, einschließlich der Dauer von Staus, in Zukunft automatisch zur Anwendung kommen wird. SUMO ermöglicht bereits heute die Abbildung der Route mit der gewünschten Anzahl von Verkehrsteilnehmer*innen. Somit können fiktive Verkehrsströme nach einer Stunde Simulation bestimmt und zum Vergleich und zur Analyse ihrer Auswirkungen bereitgestellt werden.

Darüber hinaus könnten zukünftige Parameter durch eine ständige Kommunikation zwischen den beiden Fahrzeugen verbessert werden, da der aktuelle Abstand bzw. die aktuelle Position im Einvernehmen zwischen den Fahrer*innen geklärt werden kann, wodurch Missverständnisse im Schwerverkehr (z.B. Vorfahrt bei Kreisverkehren) vermieden werden können.

7. Quellenverzeichnis

- [1] <https://www.heise.de/newsticker/meldung/TomTom-Analyse-Immer-mehr-Staus-in-deutschen-Grossstaedten-4647918.html>
- [2] <https://www.solinger-tageblatt.de/rhein-wupper/2020-startet-4000-wuppertalern-13414133.html>
- [3] <https://de.statista.com/infografik/10466/gemeldete-staus-auf-deutschen-autobahnen/>
- [4] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/verkehrslaerm#belastigung-durch-verkehrslarm>
- [5] <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/geschwindigkeit/5784>
- [6] <https://www.allianzdirect.de/kfz-versicherung/verhalten-bei-stau-ratgeber/>
- [7] <https://www.badische-zeitung.de/wie-entstehen-staus--154387327.html>
- [8] https://www.ipd.kit.edu/damast/seminar/FAS2007/pdfs/FAS2007_Reimann_Simulationsmodelle_Ausbreitung.pdf
- [9] <https://www.verkehrssimulation.ch/>
- [10] <https://sumo.dlr.de/docs/>
- [11] <https://moodle.uni-wuppertal.de/%20Grundlagen%20des%20automatisierten%20Fahrens/enrol/index.php?id=19665>
- [12] <https://www.matsim.org/>
- [13] <https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2014/14-20/user-guide-0.6.0-2014-09-12.pdf>
- [14] https://www.ipd.kit.edu/mitarbeiter/damast/seminar/FAS2007/pdfs/FAS2007_Pavlidis_Fahrerassistenzsysteme_Ausarbeitung.pdf
- [15] <https://www.aimsun.com/about-aimsun/>
- [16] https://www.ipd.kit.edu/mitarbeiter/damast/seminar/FAS2007/pdfs/FAS2007_Pavlidis_Fahrerassistenzsysteme_Ausarbeitung.pdf
- [17] <http://www.ptv.de>
- [18] https://www.ipd.kit.edu/mitarbeiter/damast/seminar/FAS2007/pdfs/FAS2007_Pavlidis_Fahrerassistenzsysteme_Ausarbeitung.pdf
- [19] https://www.ipd.kit.edu/mitarbeiter/damast/seminar/FAS2007/pdfs/FAS2007_Pavlidis_Fahrerassistenzsysteme_Ausarbeitung.pdf
- [20] <http://sites.poli.usp.br/ptr/lemt/CORSIM/CORSIMUsersGuide.pdf>
- [21] https://www.ipd.kit.edu/mitarbeiter/damast/seminar/FAS2007/pdfs/FAS2007_Pavlidis_Fahrerassistenzsysteme_Ausarbeitung.pdf
- [22] <https://archive.vn/20121205065117/http://www.wolfgang-mondorf.de/elberfeld.html#selection-707.0-707.456>

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

[23] <https://www.openstreetmap.org/#map=19/51.24315/7.15559&layers=N>

[24] <https://www.kfzteile24.de/magazin/ratgeber/kreisverkehr-verhalten-regeln>

[25] <https://www.stadt-koeln.de/artikel/03943/index.html>

[26] <https://www.nuernberg.de/internet/verkehrsplanung/kreisverkehr.html>

[27] <https://www.studocu.com/de/document/ruhr-universitaet-bochum/grundlagen-der-verkehrsplanung-und-verkehrstechnik/zusammenfassungen/expose-kreisverkehr-und-ampel/3850485/view>

[28] http://www.ivu-bw.de/Vortraege/2006/061114_Bondzio_MerkblattKreisverkehr.PDF

8. Literaturverzeichnis

- Banks, Jerry. 1998.** *Handbook of Simulation*. s.l. : 1998 John Wiley & Sons, Inc, 1998. Bde. 0-471-13403-1.
- Berger, Reinhold Maier Ralf. 2012.** *Schmale zweibahnig vierstreifige Landstraßen (RQ 21)*. Bergische Gladbach : Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2012. Bde. 978-3-86918-196-7.
- Burghout, Wilco. 2004.** *Hybrid microscopic-mesosopic traffic simulation*. 2004. Bde. ISBN 91-7323-099-5.
- Claudio, David Jessica Müller. 2014.** *SIMULATING UNSIGNALIZED INTERSECTION RIGHT-OF-WAY*. USA : Bozeman, MT 59717-3800, USA, 2014.
- Dallmeyer, Jörg. 2014.** *Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt*. Wiesbaden : Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014. Bde. 978-3-658-05207-2.
- Dieter Lohse, Werner Schnabel. 2011.** *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*. s.l. : Beuth Verlag, 2011, 2011. Bde. 3410206884, 9783410206880.
- e.V., Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. 2001.** *Grundlagen zur Bessung von Straßenverkehrsanlagen*. Köln : FGSV-Nr. 299, Fassung 2009, 2001. Bde. 978-3-941790-35-3.
- F.Daganzo, Carlos. 1994.** The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B: Methodological*. USA : s.n., 1994.
- Karl Otto Schallaböck, Rudolf Petersen. 1999.** Traffic congestion in Europe : introductory report. Paris : s.n., 1999.
- Kesting, Martin Treiber Arne. 2010.** *Verkehrsdynamik und -simulation*. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. Bde. 978-3-642-05228-6.
- Kirchhoff, Peter. 2002.** *Ermittlung und Beeinflussung der Verkehrsnachfrage*. s.l. : Vieweg+Teubner Verlag, 2002. Bde. 978-3-322-84800-0.
- Krimmling, Jürgen. 2017.** *Ampelsteuerung, Warum die grüne Welle nicht immer funktioniert*, . 2017. Bde. ISBN 978-3-658-17320-3 .
- Mathias Bertram, Stefan Bongard. 2013.** *Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr* . Wiesbaden : Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013. Bde. 978-3-658-02264-8.
- Moltenbrey, Michael. 2020.** *Einführung in die Verkehr Simulation*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2020. Bde. 978-3-658-28717-7.
- Papageorgiou, Nacef Elloumi Habib HajSalem Markos. 1997.** A Motorway-to-Motorway Control Results of a Simulation Study. *IFAC Proceedings Volumes*. 1997.
- Pflüger, Hans-Joachim BungartzStefan ZimmerMartin BuchholzDirk. 2009.** *Modellbildung und Simulation* . Heidelberg : Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. Bde. 978-3-540-79810-1.
- Saubier, T. 1999.** *Theorie und Praxis von Simulationssystemen*. 1999.
- Typus, Linus. 2014.** *Das große Buch vom Schriftsatz*. Aachen : s.n., 2014.
- . **2015.** *Das kleine Handbuch der Typografie*. Wien : s.n., 2015.

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

Wiedemann, R. 1974. *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Karlsruhe : s.n., 1974. Bde. 8, Karlsruhe, Germany 1974.

9. Anhang

9.1 Anhang 1

q=0.1

q=0.2

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	10001	
insertion-backlogged vehicles [#]	9819	
departed vehicles [#]	182	
running vehicles [#]	9	
arrived vehicles [#]	173	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	8	
avg. speed [m/s]	0.21	
avg. relative speed	0.02	
end time [s]	-1	✗
begin time [s]	0	✗
step duration [ms]	485	
FPS	1000.00	
simulation duration [ms]	4	
idle duration [ms]	481	
duration factor	250.00	
updates per second	2250.00	
avg. updates per second	4128.25	
nodes [#]	4	✗
edges [#]	3	✗
total edge length [km]	0.12	✗
total lane length [km]	0.12	✗
network version	1.30	✗

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	10001	
insertion-backlogged vehicles [#]	9637	
departed vehicles [#]	364	
running vehicles [#]	9	
arrived vehicles [#]	355	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	8	
avg. speed [m/s]	0.26	
avg. relative speed	0.02	
end time [s]	-1	✗
begin time [s]	0	✗
step duration [ms]	408	
FPS	1000.00	
simulation duration [ms]	4	
idle duration [ms]	404	
duration factor	250.00	
updates per second	2250.00	
avg. updates per second	4457.50	
nodes [#]	4	✗
edges [#]	3	✗
total edge length [km]	0.12	✗
total lane length [km]	0.12	✗
network version	1.30	✗

q=0.3

q=0,4

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	10001	
insertion-backlogged vehicles [#]	9509	
departed vehicles [#]	492	
running vehicles [#]	9	
arrived vehicles [#]	483	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	5	
avg. speed [m/s]	1.79	
avg. relative speed	0.13	
end time [s]	-1	✗
begin time [s]	0	✗
step duration [ms]	311	
FPS	1000.00	
simulation duration [ms]	2	
idle duration [ms]	309	
duration factor	500.00	
updates per second	4500.00	
avg. updates per second	4137.32	
nodes [#]	4	✗
edges [#]	3	✗
total edge length [km]	0.12	✗
total lane length [km]	0.12	✗
network version	1.30	✗

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	10001	
insertion-backlogged vehicles [#]	9384	
departed vehicles [#]	617	
running vehicles [#]	9	
arrived vehicles [#]	608	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	8	
avg. speed [m/s]	0.21	
avg. relative speed	0.02	
end time [s]	-1	✗
begin time [s]	0	✗
step duration [ms]	452	
FPS	1000.00	
simulation duration [ms]	3	
idle duration [ms]	449	
duration factor	333.33	
updates per second	3000.00	
avg. updates per second	3895.19	
nodes [#]	4	✗
edges [#]	3	✗
total edge length [km]	0.12	✗
total lane length [km]	0.12	✗
network version	1.30	✗

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

q=0.5

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	10001	<input type="checkbox"/>
insertion-backlogged vehicles [#]	9265	<input type="checkbox"/>
departed vehicles [#]	736	<input type="checkbox"/>
running vehicles [#]	9	<input type="checkbox"/>
arrived vehicles [#]	727	<input type="checkbox"/>
discarded vehicles [#]	0	<input type="checkbox"/>
collisions [#]	0	<input type="checkbox"/>
teleports [#]	0	<input type="checkbox"/>
halting [#]	7	<input type="checkbox"/>
avg. speed [m/s]	0.45	<input type="checkbox"/>
avg. relative speed	0.03	<input type="checkbox"/>
end time [s]	-1	<input checked="" type="checkbox"/>
begin time [s]	0	<input checked="" type="checkbox"/>
step duration [ms]	313	<input type="checkbox"/>
FPS	1000.00	<input type="checkbox"/>
simulation duration [ms]	4	<input type="checkbox"/>
idle duration [ms]	309	<input type="checkbox"/>
duration factor	250.00	<input type="checkbox"/>
updates per second	2250.00	<input type="checkbox"/>
avg. updates per second	3488.03	<input type="checkbox"/>
nodes [#]	4	<input checked="" type="checkbox"/>
edges [#]	3	<input checked="" type="checkbox"/>
total edge length [km]	0.12	<input checked="" type="checkbox"/>
total lane length [km]	0.12	<input checked="" type="checkbox"/>
network version	1.30	<input checked="" type="checkbox"/>

q=0.6

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	10001	<input type="checkbox"/>
insertion-backlogged vehicles [#]	9137	<input type="checkbox"/>
departed vehicles [#]	864	<input type="checkbox"/>
running vehicles [#]	9	<input type="checkbox"/>
arrived vehicles [#]	855	<input type="checkbox"/>
discarded vehicles [#]	0	<input type="checkbox"/>
collisions [#]	0	<input type="checkbox"/>
teleports [#]	0	<input type="checkbox"/>
halting [#]	8	<input type="checkbox"/>
avg. speed [m/s]	0.23	<input type="checkbox"/>
avg. relative speed	0.02	<input type="checkbox"/>
end time [s]	-1	<input checked="" type="checkbox"/>
begin time [s]	0	<input checked="" type="checkbox"/>
step duration [ms]	539	<input type="checkbox"/>
FPS	1000.00	<input type="checkbox"/>
simulation duration [ms]	3	<input type="checkbox"/>
idle duration [ms]	536	<input type="checkbox"/>
duration factor	333.33	<input type="checkbox"/>
updates per second	3000.00	<input type="checkbox"/>
avg. updates per second	3352.13	<input type="checkbox"/>
nodes [#]	4	<input checked="" type="checkbox"/>
edges [#]	3	<input checked="" type="checkbox"/>
total edge length [km]	0.12	<input checked="" type="checkbox"/>
total lane length [km]	0.12	<input checked="" type="checkbox"/>
network version	1.30	<input checked="" type="checkbox"/>

q=0.7

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	10001	<input type="checkbox"/>
insertion-backlogged vehicles [#]	9016	<input type="checkbox"/>
departed vehicles [#]	985	<input type="checkbox"/>
running vehicles [#]	9	<input type="checkbox"/>
arrived vehicles [#]	976	<input type="checkbox"/>
discarded vehicles [#]	0	<input type="checkbox"/>
collisions [#]	0	<input type="checkbox"/>
teleports [#]	0	<input type="checkbox"/>
halting [#]	8	<input type="checkbox"/>
avg. speed [m/s]	0.19	<input type="checkbox"/>
avg. relative speed	0.01	<input type="checkbox"/>
end time [s]	-1	<input checked="" type="checkbox"/>
begin time [s]	0	<input checked="" type="checkbox"/>
step duration [ms]	639	<input type="checkbox"/>
FPS	1000.00	<input type="checkbox"/>
simulation duration [ms]	2	<input type="checkbox"/>
idle duration [ms]	637	<input type="checkbox"/>
duration factor	500.00	<input type="checkbox"/>
updates per second	4500.00	<input type="checkbox"/>
avg. updates per second	2949.69	<input type="checkbox"/>
nodes [#]	4	<input checked="" type="checkbox"/>
edges [#]	3	<input checked="" type="checkbox"/>
total edge length [km]	0.12	<input checked="" type="checkbox"/>
total lane length [km]	0.12	<input checked="" type="checkbox"/>
network version	1.30	<input checked="" type="checkbox"/>

q=0.8

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	10001	<input type="checkbox"/>
insertion-backlogged vehicles [#]	8893	<input type="checkbox"/>
departed vehicles [#]	1108	<input type="checkbox"/>
running vehicles [#]	9	<input type="checkbox"/>
arrived vehicles [#]	1099	<input type="checkbox"/>
discarded vehicles [#]	0	<input type="checkbox"/>
collisions [#]	0	<input type="checkbox"/>
teleports [#]	0	<input type="checkbox"/>
halting [#]	8	<input type="checkbox"/>
avg. speed [m/s]	0.27	<input type="checkbox"/>
avg. relative speed	0.02	<input type="checkbox"/>
end time [s]	-1	<input checked="" type="checkbox"/>
begin time [s]	0	<input checked="" type="checkbox"/>
step duration [ms]	3	<input type="checkbox"/>
FPS	1000.00	<input type="checkbox"/>
simulation duration [ms]	3	<input type="checkbox"/>
idle duration [ms]	0	<input type="checkbox"/>
duration factor	333.33	<input type="checkbox"/>
updates per second	3000.00	<input type="checkbox"/>
avg. updates per second	3028.60	<input type="checkbox"/>
nodes [#]	4	<input checked="" type="checkbox"/>
edges [#]	3	<input checked="" type="checkbox"/>
total edge length [km]	0.12	<input checked="" type="checkbox"/>
total lane length [km]	0.12	<input checked="" type="checkbox"/>
network version	1.30	<input checked="" type="checkbox"/>

q=0.9

q=1

Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	10001		loaded vehicles [#]	10001	
insertion-backlogged vehicles [#]	8771		insertion-backlogged vehicles [#]	8764	
departed vehicles [#]	1230		departed vehicles [#]	1237	
running vehicles [#]	6		running vehicles [#]	4	
arrived vehicles [#]	1224		arrived vehicles [#]	1233	
discarded vehicles [#]	0		discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0		collisions [#]	0	
teleports [#]	0		teleports [#]	0	
halting [#]	2		halting [#]	1	
avg. speed [m/s]	2.14		avg. speed [m/s]	7.22	
avg. relative speed	0.15		avg. relative speed	0.52	
end time [s]	-1		end time [s]	-1	
begin time [s]	0		begin time [s]	0	
step duration [ms]	1469		step duration [ms]	1033	
FPS	1000.00		FPS	1000.00	
simulation duration [ms]	2		simulation duration [ms]	2	
idle duration [ms]	1467		idle duration [ms]	1031	
duration factor	500.00		duration factor	500.00	
updates per second	3000.00		updates per second	2000.00	
avg. updates per second	2646.37		avg. updates per second	2378.44	
nodes [#]	4		nodes [#]	4	
edges [#]	3		edges [#]	3	
total edge length [km]	0.12		total edge length [km]	0.12	
total lane length [km]	0.12		total lane length [km]	0.12	
network version	1.30		network version	1.30	

9.2 Anhang 2

Tabelle 8: Ergebnisse der Szenario 1

Q	F(q) pro 100s	F(q) pro 1Stunde	T(s)
0	0	0	-
0.1	4	173	206011
0.2	10	355	99913
0.3	13	483	74024
0.4	16	608	58839
0.5	20	727	49136
0.6	23	855	41933
0.7	27	976	36717
0.8	30	1099	32611
0.9	34	1224	29446
1	35	1233	29196

T: Zeitraum, um die Anzahl der Verkehr Alpha zu erreichen

9.3 Anhang 3

Tabelle 9: Ergebnisse der Szenario 2

α_1	α_2	q1	q2	F1	F2	T
10000	10000	0.1	0.1	153	153	222917
10000	10000	0.2	0.2	340	340	100992
10000	10000	0.3	0.3	492	492	70221
10000	10000	0.4	0.4	619	619	56427
10000	10000	0.5	0.5	727	727	47729
10000	10000	0.6	0.6	845	845	41251
10000	10000	0.7	0.7	966	966	36164
10000	10000	0.8	0.8	1118	1118	32419
10000	10000	0.9	0.9	1161	1161	30227
10000	10000	1	1	1163	1163	30196
10000	10000	1	0.9	1163	1161	30214
10000	10000	1	0.8	1163	1118	30224
10000	10000	1	0.7	1163	966	30217
10000	10000	1	0.6	1163	845	32955
10000	10000	1	0.5	1163	727	39545
10000	10000	1	0.4	1163	619	49526
10000	10000	1	0.3	1163	492	66537
10000	10000	1	0.2	1163	340	100725
10000	10000	1	0.1	1163	153	220815
10000	10000	0.9	1	1161	1163	30214
10000	10000	0.9	0.9	1161	1161	30227
10000	10000	0.9	0.8	1161	1118	30220
10000	10000	0.9	0.7	1161	966	30190
10000	10000	0.9	0.6	1161	845	32927

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

10000	10000	0.9	0.5	1161	727	39540
10000	10000	0.9	0.4	1161	619	49620
10000	10000	0.9	0.3	1161	492	66623
10000	10000	0.9	0.2	1161	340	100620
10000	10000	0.9	0.1	1161	153	222115
10000	10000	0.8	1	1118	1163	30224
1000	10000	0.8	0.9	1118	1161	30220
10000	10000	0.8	0.8	1118	1118	32419
10000	10000	0.8	0.7	1118	966	30220
10000	10000	0.8	0.6	1118	845	32942
10000	10000	0.8	0.5	1118	727	39544
10000	10000	0.8	0.4	1118	619	49632
10000	10000	0.8	0.3	1118	492	66532
10000	10000	0.8	0.2	1118	340	100725
10000	10000	0.8	0.1	1118	153	220311
10000	10000	0.7	1	966	1163	30217
10000	10000	0.7	0.9	966	1161	30190
10000	10000	0.7	0.8	966	1118	30220
10000	10000	0.7	0.7	966	966	36164
10000	10000	0.7	0.6	966	845	32419
10000	10000	0.7	0.5	966	727	39534
10000	10000	0.7	0.4	966	619	49622
10000	10000	0.7	0.3	966	492	66528
10000	10000	0.7	0.2	966	340	100725
10000	10000	0.7	0.1	966	153	222210
10000	10000	0.6	1	845	1163	32955
10000	10000	0.6	0.9	845	1161	32927
10000	10000	0.6	0.8	845	1118	32942
10000	10000	0.6	0.7	845	966	32419
10000	10000	0.6	0.6	845	845	41251
10000	10000	0.6	0.5	845	727	39546

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

10000	10000	0.6	0.4	845	619	49527
10000	10000	0.6	0.3	845	492	66532
10000	10000	0.6	0.2	845	340	100710
10000	10000	0.6	0.1	845	153	223217
10000	10000	0.5	1	727	1163	39545
10000	10000	0.5	0.9	727	1161	39540
10000	10000	0.5	0.8	727	1118	39544
10000	10000	0.5	0.7	727	966	39534
10000	10000	0.5	0.6	727	845	39546
10000	10000	0.5	0.5	727	727	47729
10000	10000	0.5	0.4	727	619	49541
10000	10000	0.5	0.3	727	492	66639
10000	10000	0.5	0.2	727	340	100810
10000	10000	0.5	0.1	727	153	222013
10000	10000	0.4	1	619	1163	49526
10000	10000	0.4	0.9	619	1161	49620
10000	10000	0.4	0.8	619	1118	49632
10000	10000	0.4	0.7	619	966	49622
10000	10000	0.4	0.6	619	845	49527
10000	10000	0.4	0.5	619	727	49541
10000	10000	0.4	0.4	619	619	564270
10000	10000	0.4	0.3	619	492	66536
10000	10000	0.4	0.2	619	340	100724
10000	10000	0.4	0.1	619	153	221617
10000	10000	0.3	1	492	1163	66537
10000	10000	0.3	0.9	492	1161	66623
10000	10000	0.3	0.8	492	1118	66532
10000	10000	0.3	0.7	492	966	66528
10000	10000	0.3	0.6	492	845	66532
10000	10000	0.3	0.5	492	727	66639
10000	10000	0.3	0.4	492	619	66536

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

10000	10000	0.3	0.3	492	492	70221
10000	10000	0.3	0.2	492	340	100628
10000	10000	0.3	0.1	492	153	221717
10000	10000	0.2	1	340	1163	100725
10000	10000	0.2	0.9	340	1161	100620
10000	10000	0.2	0.8	340	1118	100725
10000	10000	0.2	0.7	340	966	100725
10000	10000	0.2	0.6	340	845	100710
10000	10000	0.2	0.5	340	727	100810
10000	10000	0.2	0.4	340	619	100724
10000	10000	0.2	0.3	340	492	100628
10000	10000	0.2	0.2	340	340	100992
10000	10000	0.2	0.1	340	153	221717
10000	10000	0.1	1	153	1163	220815
10000	10000	0.1	0.9	153	1161	222115
10000	10000	0.1	0.8	153	1118	220311
10000	10000	0.1	0.7	153	966	222210
10000	10000	0.1	0.6	153	845	223217
10000	10000	0.1	0.5	153	727	222013
10000	10000	0.1	0.4	153	619	221617
10000	10000	0.1	0.3	153	492	221717
10000	10000	0.1	0.2	153	340	221717
10000	10000	0.1	0.1	153	153	222917

9.4 Anhang 4

Tabelle 10: Ergebnisse der Szenario 3

α 1.1	α 1.2	α 2.1	α 2.2	q1	q2	F1.1	F1.2	F2.1	F2.2
5000	2000	5000	2000	1	0.1	70	28	189	70
5000	2000	5000	2000	1	0.2	123	51	335	125
5000	2000	5000	2000	1	0.3	205	81	435	168
5000	2000	5000	2000	1	0.4	314	128	677	262
5000	2000	5000	2000	1	0.5	431	174	712	279
5000	2000	5000	2000	1	0.6	571	230	666	263
5000	2000	5000	2000	1	0.7	657	265	608	242
5000	2000	5000	2000	1	0.8	645	258	635	252
5000	2000	5000	2000	1	0.9	640	256	649	259
5000	2000	5000	2000	1	1	654	262	639	255
5000	2000	5000	2000	0.9	0.1	69	28	198	72
5000	2000	5000	2000	0.9	0.2	124	49	335	129
5000	2000	5000	2000	0.9	0.3	199	81	456	175
5000	2000	5000	2000	0.9	0.4	282	144	585	227
5000	2000	5000	2000	0.9	0.5	417	168	683	268
5000	2000	5000	2000	0.9	0.6	565	227	670	265
5000	2000	5000	2000	0.9	0.7	658	265	604	241
5000	2000	5000	2000	0.9	0.8	653	262	630	252
5000	2000	5000	2000	0.9	0.9	642	258	652	260
5000	2000	5000	2000	0.9	1	651	260	645	258
5000	2000	5000	2000	0.8	0.1	69	29	197	67
5000	2000	5000	2000	0.8	0.2	151	61	366	141
5000	2000	5000	2000	0.8	0.3	239	95	512	201
5000	2000	5000	2000	0.8	0.4	316	128	632	247
5000	2000	5000	2000	0.8	0.5	380	154	650	254
5000	2000	5000	2000	0.8	0.6	565	228	668	266
5000	2000	5000	2000	0.8	0.7	634	254	634	253
5000	2000	5000	2000	0.8	0.8	615	246	648	259
5000	2000	5000	2000	0.8	0.9	617	246	657	264
5000	2000	5000	2000	0.8	1	630	251	647	260
5000	2000	5000	2000	0.7	0.1	73	28	162	61
5000	2000	5000	2000	0.7	0.2	128	52	301	112
5000	2000	5000	2000	0.7	0.3	223	91	447	174
5000	2000	5000	2000	0.7	0.4	217	88	364	142
5000	2000	5000	2000	0.7	0.5	267	108	388	151
5000	2000	5000	2000	0.7	0.6	547	218	648	257
5000	2000	5000	2000	0.7	0.7	607	244	647	258
5000	2000	5000	2000	0.7	0.8	590	236	651	261

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

5000	2000	5000	2000	0.7	0.9	598	238	658	265
5000	2000	5000	2000	0.7	1	587	233	663	267
5000	2000	5000	2000	0.6	0.1	65	27	131	44
5000	2000	5000	2000	0.6	0.2	127	51	275	105
5000	2000	5000	2000	0.6	0.3	197	79	345	134
5000	2000	5000	2000	0.6	0.4	223	88	320	126
5000	2000	5000	2000	0.6	0.5	225	101	323	127
5000	2000	5000	2000	0.6	0.6	414	165	427	169
5000	2000	5000	2000	0.6	0.7	612	244	546	219
5000	2000	5000	2000	0.6	0.8	638	254	572	230
5000	2000	5000	2000	0.6	0.9	643	256	575	232
5000	2000	5000	2000	0.6	1	660	261	569	230
5000	2000	5000	2000	0.5	0.1	75	31	195	70
5000	2000	5000	2000	0.5	0.2	160	63	289	111
5000	2000	5000	2000	0.5	0.3	188	77	262	101
5000	2000	5000	2000	0.5	0.4	175	70	213	84
5000	2000	5000	2000	0.5	0.5	227	90	247	94
5000	2000	5000	2000	0.5	0.6	401	158	307	122
5000	2000	5000	2000	0.5	0.7	556	218	345	139
5000	2000	5000	2000	0.5	0.8	659	260	413	167
5000	2000	5000	2000	0.5	0.9	644	254	409	166
5000	2000	5000	2000	0.5	1	663	262	410	167
5000	2000	5000	2000	0.4	0.1	73	30	184	66
5000	2000	5000	2000	0.4	0.2	173	68	283	110
5000	2000	5000	2000	0.4	0.3	214	85	260	101
5000	2000	5000	2000	0.4	0.4	202	79	198	78
5000	2000	5000	2000	0.4	0.5	238	93	194	77
5000	2000	5000	2000	0.4	0.6	238	91	138	55
5000	2000	5000	2000	0.4	0.7	457	180	242	96
5000	2000	5000	2000	0.4	0.8	575	224	295	120
5000	2000	5000	2000	0.4	0.9	638	248	314	127
5000	2000	5000	2000	0.4	1	591	232	324	132
5000	2000	5000	2000	0.3	0.1	75	30	134	47
5000	2000	5000	2000	0.3	0.2	147	59	163	64
5000	2000	5000	2000	0.3	0.3	188	73	175	70
5000	2000	5000	2000	0.3	0.4	248	97	188	75
5000	2000	5000	2000	0.3	0.5	282	111	182	73
5000	2000	5000	2000	0.3	0.6	386	151	204	81
5000	2000	5000	2000	0.3	0.7	373	144	184	73
5000	2000	5000	2000	0.3	0.8	398	159	204	81
5000	2000	5000	2000	0.3	0.9	416	160	196	80
5000	2000	5000	2000	0.3	1	335	127	152	62
5000	2000	5000	2000	0.2	0.1	83	34	152	57
5000	2000	5000	2000	0.2	0.2	182	70	167	64
5000	2000	5000	2000	0.2	0.3	167	63	123	49

Simulation und Optimierung der urbanen Verkehrsflüsse und Verkehrsnetze mit Sumo am Beispiel Wuppertal

5000	2000	5000	2000	0.2	0.4	275	107	191	77
5000	2000	5000	2000	0.2	0.5	260	101	135	54
5000	2000	5000	2000	0.2	0.6	295	114	127	51
5000	2000	5000	2000	0.2	0.7	292	109	120	49
5000	2000	5000	2000	0.2	0.8	233	90	107	43
5000	2000	5000	2000	0.2	0.9	270	106	113	45
5000	2000	5000	2000	0.2	1	297	110	118	48
5000	2000	5000	2000	0.1	0.1	111	36	96	27
5000	2000	5000	2000	0.1	0.2	84	33	99	36
5000	2000	5000	2000	0.1	0.3	167	63	74	30
5000	2000	5000	2000	0.1	0.4	155	59	76	32
5000	2000	5000	2000	0.1	0.5	198	66	77	26
5000	2000	5000	2000	0.1	0.6	187	67	74	29
5000	2000	5000	2000	0.1	0.7	176	64	67	26
5000	2000	5000	2000	0.1	0.8	172	69	74	30
5000	2000	5000	2000	0.1	0.9	174	55	63	24
5000	2000	5000	2000	0.1	1	163	61	72	28

9.5 Anhang 5:

Tabelle 11: Ergebnisse der SUMO und FIFO

q1	q2	F1.1	F1.2	F2.1	F2.2	SUMO	FIFO
1	0.1	70	28	189	70	357	346
1	0.2	123	51	335	125	634	710
1	0.3	205	81	435	168	889	966
1	0.4	314	128	677	262	1381	1216
1	0.5	431	174	712	279	1596	1454
1	0.6	571	230	666	263	1730	1710
1	0.7	657	265	608	242	1772	1952
1	0.8	645	258	635	252	1790	2198
1	0.9	640	256	649	259	1804	2448
1	1	654	262	639	255	1810	2466
0.9	0.1	69	28	198	72	367	346
0.9	0.2	124	49	335	129	637	710
0.9	0.3	199	81	456	175	911	966
0.9	0.4	282	144	585	227	1238	1216
0.9	0.5	417	168	683	268	1536	1454
0.9	0.6	565	227	670	265	1727	1710
0.9	0.7	658	265	604	241	1768	1952
0.9	0.8	653	262	630	252	1797	2198
0.9	0.9	642	258	652	260	1812	2448
0.9	1	651	260	645	258	1814	2448
0.8	0.1	69	29	197	67	362	346
0.8	0.2	151	61	366	141	719	710
0.8	0.3	239	95	512	201	1047	966
0.8	0.4	316	128	632	247	1323	1216
0.8	0.5	380	154	650	254	1438	1454
0.8	0.6	565	228	668	266	1727	1710
0.8	0.7	634	254	634	253	1775	1952
0.8	0.8	615	246	648	259	1768	2198
0.8	0.9	617	246	657	264	1784	2198
0.8	1	630	251	647	260	1788	2198
0.7	0.1	73	28	162	61	324	346
0.7	0.2	128	52	301	112	593	710
0.7	0.3	223	91	447	174	935	966
0.7	0.4	217	88	364	142	811	1216
0.7	0.5	267	108	388	151	914	1454
0.7	0.6	547	218	648	257	1670	1710
0.7	0.7	607	244	647	258	1756	1952
0.7	0.8	590	236	651	261	1738	1952
0.7	0.9	598	238	658	265	1759	1952
0.7	1	587	233	663	267	1750	1952

0.6	0.1	65	27	131	44	267	346
0.6	0.2	127	51	275	105	558	710
0.6	0.3	197	79	345	134	755	966
0.6	0.4	223	88	320	126	757	1216
0.6	0.5	225	101	323	127	776	1454
0.6	0.6	414	165	427	169	1175	1710
0.6	0.7	612	244	546	219	1621	1710
0.6	0.8	638	254	572	230	1694	1710
0.6	0.9	643	256	575	232	1706	1710
0.6	1	660	261	569	230	1720	1710
0.5	0.1	75	31	195	70	371	346
0.5	0.2	160	63	289	111	623	710
0.5	0.3	188	77	262	101	628	966
0.5	0.4	175	70	213	84	542	1216
0.5	0.5	227	90	247	94	658	1454
0.5	0.6	401	158	307	122	988	1454
0.5	0.7	556	218	345	139	1258	1454
0.5	0.8	659	260	413	167	1499	1454
0.5	0.9	644	254	409	166	1473	1454
0.5	1	663	262	410	167	1502	1454
0.4	0.1	73	30	184	66	353	346
0.4	0.2	173	68	283	110	634	710
0.4	0.3	214	85	260	101	660	966
0.4	0.4	202	79	198	78	557	1216
0.4	0.5	238	93	194	77	602	1216
0.4	0.6	238	91	138	55	522	1216
0.4	0.7	457	180	242	96	975	1216
0.4	0.8	575	224	295	120	1214	1216
0.4	0.9	638	248	314	127	1327	1216
0.4	1	591	232	324	132	1279	1216
0.3	0.1	75	30	134	47	286	346
0.3	0.2	147	59	163	64	433	710
0.3	0.3	188	73	175	70	506	966
0.3	0.4	248	97	188	75	608	966
0.3	0.5	282	111	182	73	648	966
0.3	0.6	386	151	204	81	822	966
0.3	0.7	373	144	184	73	774	966
0.3	0.8	398	159	204	81	842	966
0.3	0.9	416	160	196	80	852	966
0.3	1	335	127	152	62	676	966
0.2	0.1	83	34	152	57	326	346
0.2	0.2	182	70	167	64	483	710
0.2	0.3	167	63	123	49	402	710
0.2	0.4	275	107	191	77	650	710
0.2	0.5	260	101	135	54	550	710

0.2	0.6	295	114	127	51	587	710
0.2	0.7	292	109	120	49	570	710
0.2	0.8	233	90	107	43	473	710
0.2	0.9	270	106	113	45	534	710
0.2	1	297	110	118	48	573	710
0.1	0.1	111	36	96	27	270	346
0.1	0.2	84	33	99	36	252	346
0.1	0.3	167	63	74	30	334	346
0.1	0.4	155	59	76	32	322	346
0.1	0.5	198	66	77	26	367	346
0.1	0.6	187	67	74	29	357	346
0.1	0.7	176	64	67	26	333	346
0.1	0.8	172	69	74	30	345	346
0.1	0.9	174	55	63	24	316	346
0.1	1	163	61	72	28	324	346