



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit
Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux

Bewertung und Optimierung der Verkehrsflüsse in Solingen mittels Simulation

Masterarbeit

Vorgelegt von Anis, Torjeman
Matrikel-Nr.:1738029

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

Zweitprüfer: Raphael Korbmacher

Wuppertal, 19.07.2022

Diese Arbeit wurde vorgelegt am Fachgebiet für Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit
Bergische Universität Wuppertal Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Eidesstattliche Erklärung.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Kontext.....	1
1.2 Thema.....	1
1.3 Problemstellung.....	2
1.4 Zielsetzung.....	2
1.5 Aufbau der Arbeit.....	2
2 Verkehrsflusstheorie.....	4
2.1 Ursprung der Verkehrsflusstheorie.....	4
2.2 Mikroskopische Merkmale des Verkehrsflusses.....	4
2.2.1 Räumlicher Abstand „Space headway“.....	7
2.2.2 Zeitlicher Abstand „Time headway“.....	9
2.3 Makroskopische Merkmale des Verkehrsflusses.....	11
2.3.1 Verkehrsstärke.....	11
2.3.2 Verkehrsdichte.....	11
2.3.3 Geschwindigkeit.....	12
2.4 Fundamentaldiagramm.....	14
2.4.1 Ursprung des Fundamentaldiagramms.....	14
2.4.2 Die allgemeine Form eines Fundamentaldiagramms.....	15
2.4.3 Verhältnis Verkehrsdichte zur Durchschnittsgeschwindigkeit.....	16
2.4.4 Verhältnis von Verkehrsstärke zur Verkehrsdichte.....	17
2.4.5 Verhältnis der Verkehrsstärke zur Durchschnittsgeschwindigkeit.....	18
3 Knotenpunkte und Lichtsignalanlagen.....	19
3.1 Grundlagen der Knotenpunkte.....	19
3.1.1 Arten von Knotenpunkten.....	19
3.1.2 Knotenpunktformen.....	19
3.1.3 Konfliktpunkte an Kreuzungen.....	23
3.2 Lichtsignalanlage (LSA).....	25
3.3.1 Ursprung.....	25
3.3.2 Grundprinzipien.....	25
3.3.3 Ziel.....	26

3.3.4	Funktionsweise von Phasen.....	26
3.3.5	Farbwechselzeit	26
3.3.6	Alles rote Zeit	26
3.3.7	Zeit zwischen grünen Signalen.....	26
3.3.8	Sättigungsfluss (S)	27
3.3.9	Zeit der effektiven Grünphase	27
4	Verkehrssimulation	28
4.1	Simulation	28
4.2	Verkehr	28
4.3	Verkehrssimulation.....	28
4.4	Vergleich von Simulationssoftware.....	29
4.4.1	Verkehrssimulationssoftware.....	30
4.4.2	Vergleich Kriterien.....	34
4.4.3	Ergebnisse.....	36
4.5	OpenStreetMap.....	37
4.5.1	Ursprung von OpenStreetMap.....	37
4.5.2	Prinzipien von OpenStreetMap.....	37
4.5.3	Vorteile von OpenStreetMap	37
4.5.4	Nutzen von OpenStreetMap	37
4.6	Kartographische Daten.....	38
4.7	Informationen über dem Verkehr.....	39
5	Simulation und Auswertung	43
5.1	Vorbereitung des Szenarios	43
5.2	Vergleich des importierten Verkehrsflusses mit den erhobenen Werten.....	44
5.3	Beschreibung der Szenarien	45
5.4	Auswahl von Straßen	46
5.5	Auslegung von Verkehrsflüssen	47
5.6	Einstellung von Lichtsignalanlagen.....	48
5.7	Implementierung des ersten Szenarios	48
5.8	Ergebnisse des ersten Szenarios.....	50
5.9	Implementierung des zweiten Szenarios	50
5.10	Ergebnisse des zweiten Szenarios	51
5.11	Implementierung des dritten Szenarios.....	52
5.12	Ergebnisse des dritten Szenarios	53
6	Fazit & Ausblick.....	54
7	Literaturverzeichnis.....	55

8	Anhang.....	58
8.1	Anhang 1.....	58
8.2	Anhang 2.....	60
8.3	Anhang 3.....	62

Eidesstattliche Erklärung

Torjeman, Anis:

Erklärung

Hiermit, erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit (Bachelor/Master-Thesis) selbstständig verfasst und keine andere als die angegebene Quelle und Hilfsmittel benutzt sowie Stellen der Abschlussarbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Ich bin damit einverstanden, dass die Arbeit durch Dritte eingesehen und unter Wahrung urheberrechtlicher Grundsätze zitiert werden darf.

Datum und Ort: 19.07.2022, Wuppertal



Unterschrift:

Abkürzungsverzeichnis

MSV:	Mikroskopische Verkehrssimulation
SUMO:	Simulation of Urban Mobility
API:	Application Programming Interface
DIVAs:	Dynamic Information Visualization of Agent systems
GIS:	Geographisches Informationssystem
x_i :	Position des Fahrzeugs i
l_i :	Länge des Fahrzeugs i
v_i :	Geschwindigkeit des Fahrzeugs i
a_i :	Beschleunigung des Fahrzeugs i
S_i :	Räumliche Abstand
g_i :	Raumlücke
h_i :	Zeitliche Abstand
gt_i :	Zeit Lücke
ρ_i :	Belegungszeit
\bar{h} :	mean time headway
q :	Verkehrsstärke
n :	Anzahl der Fahrzeuge in dem Straßenabschnitt
T :	Zeitabstand
h_i :	Zeitliche Abstand zwischen dem Fahrzeug i und dem Fahrzeug $i + 1$
\bar{s} :	mittlerer räumliche Abstand
S_i :	Räumliche Abstand zwischen dem Fahrzeug i und dem Fahrzeug $i + 1$
k :	Verkehrsdichte
X :	Straßenlänge ist gleich der Summe der " Räumlichen Abstände " S_i
m :	Anzahl der Fahrzeuge
v_L :	Lokale Geschwindigkeit
v_M :	Momentane Geschwindigkeit
OSM:	OpenStreetMap
LSA:	Lichtsignalanlage
MATSim:	Multi-Agent Transport Simulation
CORSIM:	CORridor SIMulation

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Position.....	5
Abbildung 2: Länge	6
Abbildung 3: Fahrbahn (9).....	7
Abbildung 4: Raumabstand	8
Abbildung 5: Zeitraumdiagramm (8)	9
Abbildung 6: Die Geschwindigkeit im Zeit-Raum-Diagramm (8)	14
Abbildung 7: Fundamentaldiagramm zwischen q , k und v (15).....	15
Abbildung 8 : Ein fundamentales Diagramm, das die Verkehrsdichte k mit der Mittlere Räumliche Geschwindigkeit in Beziehung setzt.....	16
Abbildung 9: Ein fundamentales Diagramm, das die Verkehrsdichte k mit dem Verkehrsstärke q in Beziehung setzt	17
Abbildung 10: Ein fundamentales Diagramm, das die Mittlere Räumliche Geschwindigkeit v mit dem Verkehrsstärke q in Beziehung setzt.....	18
Abbildung 11: T-Knotenpunkt	20
Abbildung 12: Y-Knotenpunkt.....	20
Abbildung 13: Einfache Kreuzung.....	21
Abbildung 14: X-Knotenpunkt.....	21
Abbildung 15: Knotenpunkt mit mehreren Armen	22
Abbildung 16: Kreisverkehr	22
Abbildung 17:Anwendungsbereiche von Kreisverkehrsplätzen (16).....	23
Abbildung 18: Konfliktpunkte (17).....	24
Abbildung 19: Skizze einer Lichtsignalanlage.....	25
Abbildung 20: Abfluss der Fahrzeugschlange über die Haltelinie (19)	27
Abbildung 21: Visualisierung des Solinger Simulationsgebietes in SUMO	30
Abbildung 22: Visualisierung eines Beispiels für die graphische Darstellung von Aimsun (28)	31
Abbildung 23: Visualisierung der Île-de-France, France in MATSim (30).....	32
Abbildung 24: Visualisierung eines Beispiels für die graphische Darstellung von CORSIM ..	32
Abbildung 25: Visualisierung eines Beispiels für die graphische Darstellung von Simtraffic (32)	33
Abbildung 26: Visualisierung eines Beispiels für die graphische Darstellung von Vissim (33)	34
Abbildung 27: Solingens Lage in Bezug auf die Autobahnen.....	38

Abbildung 28: Kreuzung Bonner Str./Langhans Str. mit OpenStreetMap	39
Abbildung 29: Die Kreuzung zwischen Bonner Straße und Langhansstraße mit SUMO	41
Abbildung 30: Visualisierung der Benutzeroberfläche von OSM Web Wizard	44
Abbildung 31: Visualisierung der Simulation mit den von SUMO gelieferten Parametern	45
Abbildung 32: Demand Menü	46
Abbildung 33: Visualisierung der Festlegung einer Fahrspur	47
Abbildung 34: Definition von Attributen	47
Abbildung 35: Network Menü	48
Abbildung 36: Einstellungstabelle der Lichtsignalanlage	48
Abbildung 37: Simulation des ersten Szenarios	49
Abbildung 38 Ergebnisse des ersten Szenarios	50
Abbildung 39: Simulation des zweiten Szenarios	51
Abbildung 40 Ergebnisse des zweiten Szenarios	51
Abbildung 41 Simulation des dritten Szenarios	52
Abbildung 42 Ergebnisse des dritten Szenarios	53

1 Einleitung

1.1 Kontext

Die ganze Welt erlebt einen Wandel und eine Weiterentwicklung ihrer Verwaltungsinstrumente, der Bearbeitung von üblichen Vorgängen etc. Die größte Herausforderung ist die Digitalisierung und Automatisierung von Management- und Problemlösungsinstrumenten.

Aus diesem Grund ist es heutzutage unerlässlich, mit dem beschleunigten Tempo der Akteure bei der Einführung neuer Technologien Schritt zu halten. Innovation muss in vielen verschiedenen Institutionen stattfinden.

In diesem Zusammenhang unternimmt die Region NRW einen wichtigen Schritt in Richtung Zukunftsvision. Das Förderprojekt "Bergisch.Smart_Mobility: KI als Katalysator für die Mobilität der Zukunft" bietet eine hervorragende Gelegenheit, Innovationen für die Mobilität der Zukunft in das Städtedreieck (Wuppertal, Solingen, Remscheid) zu bringen. Neue Werkzeuge, wie künstliche Intelligenz (KI), maschinelles Lernen und Datenanalyse tragen dazu bei, innovative Mobilitätskonzepte für digitale Lösungen zu entwickeln. In diesem Zusammenhang betrachtet unser Projekt einen Teil des Großprojekts "Bergisch.Smart_Mobility: Künstliche Intelligenz als Katalysator für die Mobilität der Zukunft". Tatsächlich umfasst dieses Großprojekt vier Teilprojekte: Das erste Teilprojekt ist "Smart Vehicle & On-Demand Services", in den Sensoren und die für einen On-Demand-Service erforderlichen Algorithmen entwickelt werden. Das zweite Teilprojekt trägt den Titel "KI-basiertes Verkehrsmanagement". In diesem Projekt werden kooperative digitale Kartendienste entwickelt, um das Verkehrsmanagement zu optimieren. Das nächste Unterprojekt lautet "Intelligentes Fahren in Stadtvierteln" und in diesem Projekt werden neue Mobilitätslösungen für Stadtviertel entwickelt. Das Unterprojekt "Mobilität neu denken" schließlich zielt darauf ab, Bürger und Unternehmen frühzeitig einzubeziehen, um einen stabilen Wandel hin zu einer neuen Mobilität zu erreichen. (1)

1.2 Thema

Angesichts der Belastungen durch Straßenverkehrsprobleme aufgrund von Verkehrsstaus in der Stadt Solingen wird das Thema in der Presse aufgegriffen und die Verantwortlichen versuchen eine effektive Lösung für das Problem zu finden.

Tatsächlich werden zwei Zeitungsartikel präsentiert, die sich mit diesem Thema befassen. Der erste Artikel, "Komplizierte Verkehrsführung Politik sieht Pläne zum Kreisverkehr kritisch", erschienen am 19.11.2019, und der zweite Artikel, "ST vor Ort - Ohligs: Nur ein Kreisverkehr mit Bypässen hätte Aussicht auf Erfolg", am 07.10.2020. (2) (3)

Laut diesen Quellen halten einige Entscheidungsträger Kreisverkehre für das Wundermittel gegen Verkehrsstaus, während andere die Schaffung von Umgehungsstraßen als Lösung für problematische Kreuzungen betrachten. Tatsächlich diskutiert der Bezirk Ohligs seit über 15 Jahren über die Einrichtung eines Kreisverkehrs an der Kreuzung Bonner Straße / Langhansstraße / Viehbachtalstraße (L 288). Die Projektpläne wurden im November 2019 vorgestellt, aber aufgrund des Auftretens von Corona verzögert sich das Projekt. (3)

Um eine optimale und effektive Lösung zu implementieren, ist laut dem Stadtdirektor eine Mikroskopische Verkehrssimulation (MVS) zwingend erforderlich. Sie wird mehr Gewissheit bringen als die Einrichtung einer Umgehungsstraße, ohne dass die Wirksamkeit der Lösung sichergestellt ist. (3)

1.3 Problemstellung

Das Management des Straßenverkehrs hat sich seit Jahrzehnten kaum verändert. Gleichzeitig ist die Bevölkerungszahl gestiegen und damit auch die Zahl der Autos, die auf den Straßen unterwegs sind. Heute kann der Verkehr mit den alten Methoden nicht mehr angemessen gesteuert werden.

Die Herausforderung bei diesem Projekt besteht darin, die Probleme von Staus, stockendem Verkehr und Zeitverlust, die in der Stadt Solingen und überall auf der Welt immer mehr zugenommen haben zu bewältigen.

1.4 Zielsetzung

Das Hauptziel, das mit diesem Masterprojekt erreicht werden soll, ist eine effiziente und intelligente Lösung zur Verbesserung und Perfektionierung des Verkehrsflussmanagements und der Verkehrsnetze in einem Teil des Kreises Solingen.

Während des Projekts werden verschiedene Elemente wie Wissenschaft, Literatur und wissenschaftliche Artikel herangezogen, um eine optimale Lösung für die alltäglichen Probleme zu finden, mit denen Städte auf der ganzen Welt konfrontiert sind.

Das spezifische Ziel ist die Verbesserung des Verkehrsmanagements und der Verkehrsführung im Knotenpunkt, die Minimierung von Staus und Wartezeiten zwischen Langhans und Bonner Straße, was mit Hilfe der SUMO-Software erreicht werden soll.

1.5 Aufbau der Arbeit

Dieses Projekt besteht aus sechs Kapiteln, einschließlich der Einleitung und der Schlussfolgerung. Das erste Kapitel stellt eine allgemeine Einleitung dar, es behandelt den allgemeinen Rahmen des Masterprojekts. Das zweite Kapitel behandelt den Ursprung der Verkehrsflusstheorie, die mikroskopischen und makroskopischen Merkmale des Verkehrsflusses. Die Arbeit basiert auf Literaturrecherchen und wissenschaftlichen Artikeln.

Im dritten Kapitel werden die Begriffe und technischen Grundlagen von Knotenpunkten und Ampeln beschrieben. Diese werden für die Durchführung unseres Projekts relevant sein.

Im vierten Kapitel werden die Begriffe Simulation, Verkehr und Verkehrssimulation vorgestellt. Es werden verschiedene Simulationsprogramme vorgestellt und miteinander verglichen, wobei bestimmte Kriterien zugrunde gelegt werden, die im selben Kapitel erläutert werden. Der Vergleich basiert auf Literatur und Meinungen von Forschern, die in wissenschaftlichen Artikeln veröffentlicht wurden. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird das OpenStreetMap-Tool vorgestellt und die Methode der Datenerhebung im Feld erläutert.

Kapitel 5 beginnt mit einer Feldstudie, um den Verkehrsfluss im Knotenpunkt zu ermitteln. Anschließend wird eine Beschreibung eines Szenarios präsentiert, das wir in SUMO einführen/simulieren werden. Anschließend werden die Simulationsergebnisse mit den realen Daten verglichen, die zu Beginn der Umfrage gesammelt wurden.

Das sechste und letzte Kapitel stellt schließlich den Abschluss unseres Projekts dar. Hier werden die Ergebnisse unserer Forschung sowie die Grenzen und Hindernisse auf die wir gestoßen sind, erörtert. Es wird insbesondere unsere Perspektiven hervorheben.

2 Verkehrsflusstheorie

In diesem Kapitel werden wir den theoretischen Rahmen der Verkehrsflusstheorie anhand der Literatur und der Theorien zum Thema Verkehr vorstellen und die Schlüsselbegriffe erläutern. Hierzu werden wir die Merkmale der mikroskopischen und makroskopischen Modelle genauer erläutern.

2.1 Ursprung der Verkehrsflusstheorie

Vor den 1950er Jahren wurde das Straßenverkehrsmanagement von den Praktikern gemacht. Diese maßen den Problemen des Straßenverkehrs keine große Bedeutung bei, weshalb die Lösungen zu dieser Zeit nicht relativ zuverlässig waren. Später hat die Demokratisierung des Automobils dem Straßenverkehrsmanagement und den Verkehrsproblemen im Allgemeinen eine große Bedeutung verliehen. (4)

Das erste Gleichgewichtsprinzip wurde von dem englischen Mathematiker und Verkehrsanalytiker John Glen Wardrop im Jahr 1952 als Wardrop-Prinzip vorgestellt. Seitdem haben sich Ingenieure zunehmend mit dieser Theorie befasst. Die Verkehrsflusstheorie befasst sich mit den Interaktionen zwischen allen Verkehrsteilnehmern, z. B. Fußgängern, Radfahrern, Fahrern und ihren Fahrzeugen, sowie mit der Infrastruktur, z. B. Autobahnen, Verkehrszeichen und Verkehrsleitsystemen. (5) Die Verwendung von Mathematik in theoretischen Analysen stellt für Wissenschaftler eine solide Grundlage dar, und das Interesse an der Forschung in dieser Zeit hat zu einem wichtigen Impuls geführt. Ein Beispiel ist das fluid-dynamische Modell von Michael James Lighthill, Gerald Beresford Whitham und Paul Richards (LWR-Modell). Besonders erwähnenswert sind die Experimente und Theorien zur Fahrzeugverfolgung, die vom Club der Mitarbeiter des Forschungslabors von General Motors entwickelt wurden. (6)

Seit dieser Zeit hat sich dieser Bereich erheblich weiterentwickelt. Heute, mit dem Aufkommen intelligenter Verkehrssysteme, ist die Verkehrsflusstheorie Gegenstand fortgeschrittener Forschung und Anwendung. In der Tat erlebt die Verkehrsflusstheorie eine wahre Revolution, was sich in einem exponentiellen Wachstum in diesem Bereich niederschlägt, das vor allem auf die weltweite Begeisterung zurückzuführen ist.

2.2 Mikroskopische Merkmale des Verkehrsflusses

Ein mikroskopisches Modell des Verkehrsflusses ermöglicht die Analyse des Verkehrsflusses durch die Modellierung der Fahrer-Fahrer- und Fahrer-Straße-Interaktionen innerhalb eines Verkehrsflusses, indem jeweils die Interaktion zwischen einem Fahrer und einem anderen Fahrer auf der Straße und die Interaktion eines einzelnen Fahrers auf den verschiedenen Merkmalen einer Straße bewertet wird.

Da der Prozess der Teilnahme an einem Verkehrsfluss stark auf Verhaltensaspekten basiert, die mit menschlichen Fahrern in Verbindung gebracht werden (7), würde es wichtig erscheinen, diese menschlichen Faktoren in die Modellierungsgleichungen einzubeziehen. Dies führt jedoch zu einem starken Anstieg der Komplexität, was nicht immer ein erwünschtes Artefakt ist. Im Rest dieses Abschnitts wird eine Fahrzeug-Fahrer-Kombination jedoch immer als eine einzige Entität betrachtet und nur bestimmte, mit dem Fahrzeug verbundene Merkmale des Verkehrsflusses berücksichtigt. (8)

Die wichtigsten Variablen im Zusammenhang mit dem Fahrzeug sind eine Fahrbahn, eine Länge l , eine Position x , eine Geschwindigkeit v und eine Beschleunigung a . Diese und andere mit ihnen verbundene Variablen werden in diesem Kapitel besprochen.

- Position x_i
- Länge l_i
- Fahrbahn
- Geschwindigkeit $v_i = \frac{dx_i}{dt}$
- Beschleunigung $a_i = \frac{dv_i}{dt} = \frac{d^2x_i}{dt^2}$

Zusätzlich zu den im vorherigen Absatz genannten Variablen kann die Liste durch die Höhe, die Breite und die Neigung der Straße sowie durch die Stoßkraft, die von der Beschleunigung abgeleitet wird, ergänzt werden. (8)

- Position x_i

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Position x_i eines Fahrzeugs im Allgemeinen als die Position seines hinteren Stoßfängers angesehen wird. Die Position eines Fahrzeugs, die zu einem Zeitpunkt gemessen wird, wird bezeichnet als $x_i(t)$

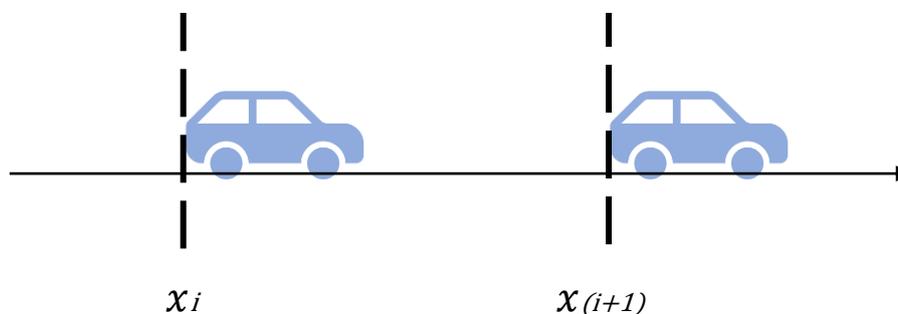


Abbildung 1: Position

- Länge l_i

Die Länge eines Fahrzeugs ist das Maß für den Abstand zwischen dem hinteren und dem vorderen Stoßfänger und wird bezeichnet als $l_i(t)$

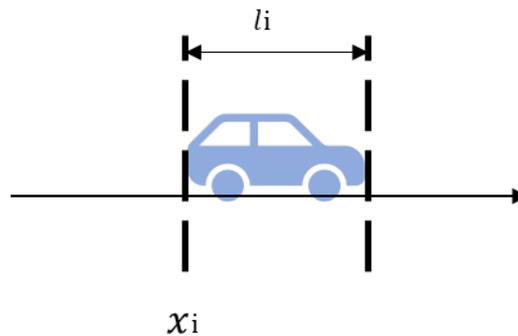


Abbildung 2: Länge

- Fahrzeug-Fahrbahn

Bei der Analyse eines bestimmten Transportvorgangs muss man sehr oft die Position eines Fahrzeugs entlang eines eindimensionalen Fahrwegs als Funktion der Zeit verfolgen und die relevanten Informationen in verständlicher Weise zusammenfassen. Dies kann mit Hilfe der Mathematik geschehen, wenn man eine Variable x zur Bezeichnung der Entfernung entlang des Fahrwegs von einem beliebigen Bezugspunkt und eine weitere Variable t zur Bezeichnung der seit einem beliebigen Zeitpunkt verstrichenen Zeit verwendet. Dann kann die gewünschte Information durch eine Funktion $x(t)$ bereitgestellt werden, die ein x für jedes t . (9)

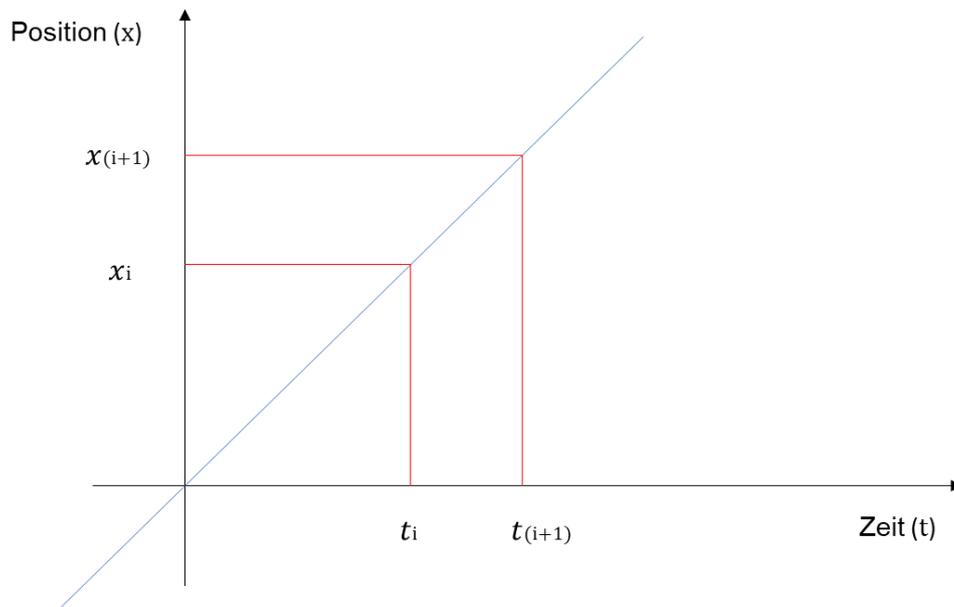


Abbildung 3: Fahrbahn (9)

- Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit ist eine Größe, die das Verhältnis einer Entwicklung zurzeit misst. Insbesondere in der Kinematik ist die Geschwindigkeit eine Größe, die für eine Bewegung das Verhältnis der zurückgelegten Strecke zur verflorenen Zeit misst. (8) Sie wird bezeichnet als v_i

$$v_i = \frac{dx_i}{dt}$$

- Beschleunigung

Die Beschleunigung ist eine vektorielle physikalische Größe, genauer gesagt ein Beschleunigungsvektor, der in der Kinematik verwendet wird, um die Änderung der Geschwindigkeit einer Bewegung in Abhängigkeit von der Zeit darzustellen. (8)

Sie wird bezeichnet als a_i

$$a_i = \frac{dv_i}{dt} = \frac{d^2x_i}{dt^2}$$

2.2.1 Räumlicher Abstand „Space headway“

Abbildung [4] zeigt zwei aufeinanderfolgende Fahrzeuge, die sich in einem Verkehrsfluss auf derselben Spur befinden: einen Nachzügler i und seinen Anführer

$i + 1$. In der Abbildung ist zu sehen, dass das Fahrzeug i einen gewissen räumlichen Abstand S_i gegenüber seinem Vorgänger hat (es wird in Metern ausgedrückt), der sich aus dem

Zwischenraum (dem sogenannten Raumlücke) g_i zu diesem Führer und seiner eigenen Länge l_i zusammensetzt:

$$S_i = g_i + l_i \quad [1]$$

S_i : Räumlicher Abstand

g_i : Raumlücke

l_i : Die Länge des Fahrzeugs

Nimmt man, wie bereits erwähnt, die hintere Stoßstange als Position des Fahrzeugs an, ergibt sich der räumliche Abstand

$$S_i = x_{i+1} - x_i \quad [2]$$

S_i : Räumlicher Abstand

x_i : Die Position des Fahrzeugs i

x_{i+1} : Die Position des Fahrzeugs $i + 1$

Die räumliche Lücke g_i wird also zwischen der vorderen Stoßstange eines Fahrzeugs und der hinteren Stoßstange seines Vordermanns gemessen (8)

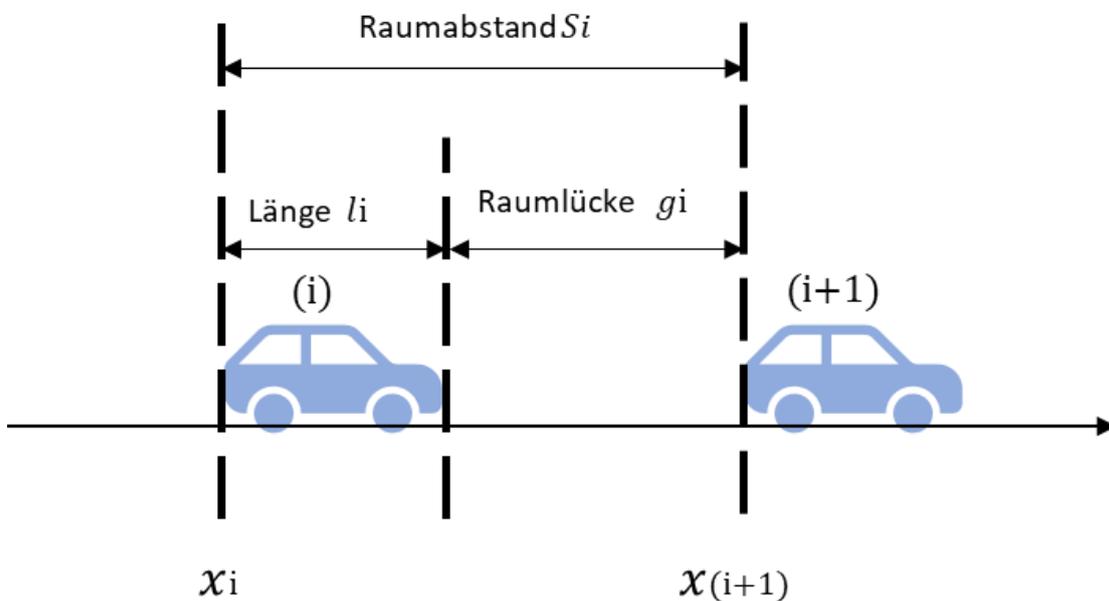


Abbildung 4: Raumabstand

2.2.2 Zeitlicher Abstand „Time headway“

Analog zu Gleichung (1) hat jedes Fahrzeug auch einen zeitlichen Abstand h_i (ausgedrückt in Sekunden), der sich aus einer Zeit Lücke gt_i und einer Belegungszeit ρ_i besteht:

$$h_i = gt_i + \rho_i \quad [3]$$

h_i : Zeitlicher Abstand

gt_i : Zeit Lücke

ρ_i : Belegungszeit

Sowohl der räumliche als auch der zeitliche Abstand können in einem Zeit-Raum-Diagramm dargestellt werden, wie in Abb. 5. Hier sind die beiden Fahrzeuge i und $i + 1$ während der Fahrt dargestellt. Ihre Positionen x_i und x_{i+1} können in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen werden, sodass zwei Fahrzeugtrajektorien entstehen. Da die Zeitrichtung horizontal und die Raumrichtung vertikal ist, lassen sich die jeweiligen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge aus den Tangenten der Trajektorien ableiten (8)

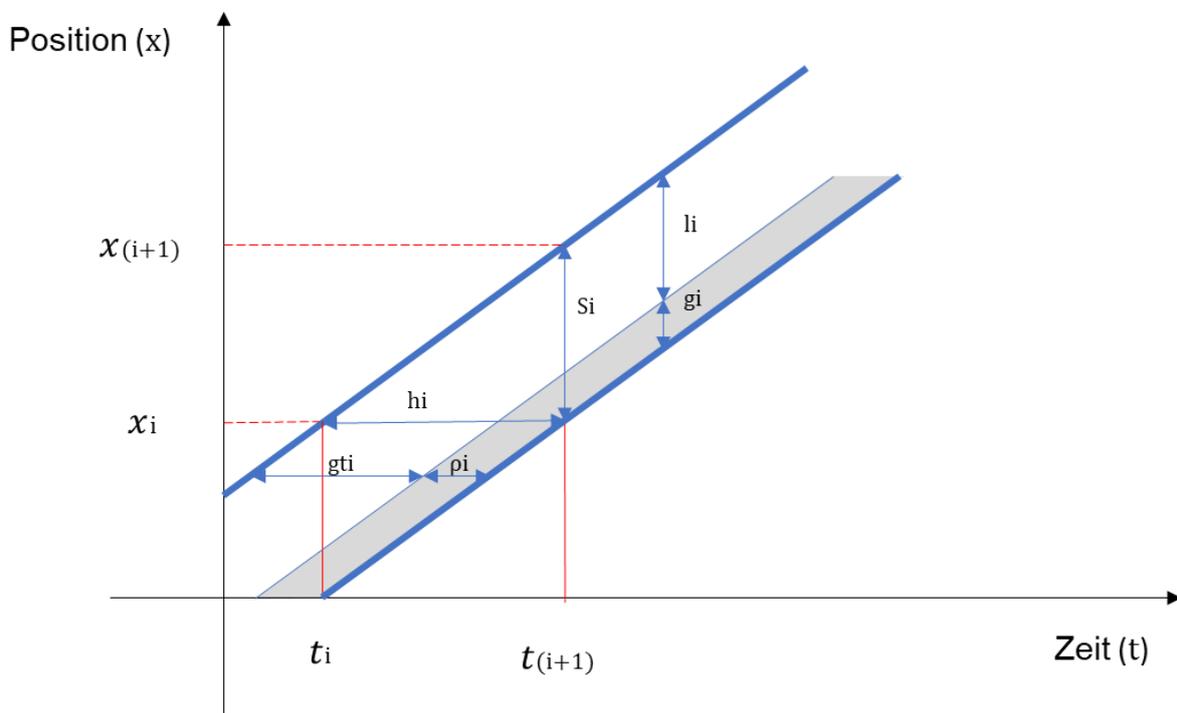


Abbildung 5: Zeitraumdiagramm (8)

Beschleunigende Fahrzeuge haben stark geneigte Bahnen, während die Bahnen stehender Fahrzeuge horizontal verlaufen. Bei konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit ist der zeitliche Abstand die Zeit, die benötigt wird, um die aktuelle Position des Führenden zu erreichen, wenn er sich mit der aktuellen Geschwindigkeit bewegt.

In ähnlicher Weise kann die Besetzungszeit als die Zeit interpretiert werden, die benötigt wird, um eine Strecke zurückzulegen, die der Länge des Fahrzeugs bei der aktuellen Geschwindigkeit entspricht, (10) d. h.

$$\rho_i = \frac{l_i}{v_i} \quad [4]$$

ρ_i : Der Belegungszeit

l_i : Die Länge des Fahrzeugs

v_i : Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs

Die beiden Gleichungen [1] und [3] sind außerdem wie folgt mit der Geschwindigkeit v_i des Fahrzeugs verknüpft:

$$\frac{s_i}{h_i} = \frac{g_i}{gt_i} = \frac{l_i}{\rho_i} = v_i \quad [5]$$

s_i : Räumlicher Abstand

h_i : Zeitlicher Abstand

g_i : Raumlücke

gt_i : Zeit Lücke

ρ_i : Der Belegungszeit

l_i : Die Länge des Fahrzeugs

v_i : Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs

2.3 Makroskopische Merkmale des Verkehrsflusses

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die wichtigsten mikroskopischen Variablen des Verkehrsflusses beschrieben. In diesem Abschnitt werden die wesentlichen makroskopischen Variablen - d.h. das allgemeine Verhalten des Verkehrsflusses und nicht das jedes einzelnen Fahrzeugs beschreiben: Durchfluss, Dichte und mittlere Geschwindigkeit sowie die Wechselbeziehungen zwischen ihnen.

2.3.1 Verkehrsstärke

Die Verkehrsstärke eines Verkehrsflusses ist die Anzahl der Fahrzeuge, die einen Straßenquerschnitt in einer Zeiteinheit passieren.

Der Durchfluss kann als ein zeitliches Maß betrachtet werden. Der Durchfluss wird üblicherweise als Stundensatz ausgedrückt, d. h. als Anzahl der Fahrzeuge pro Stunde. Gelegentlich werden auch andere Synonyme wie Intensität, Fluss, Durchfluss, Strom oder Volumen verwendet, die sich in der Regel nach dem wissenschaftlichen Hintergrund der betreffenden Person richten. (11)

$$q = \frac{n}{T} \quad [6]$$

q : Die Verkehrsstärke

n : Anzahl der Fahrzeuge in dem Straßenabschnitt

T : Die Summe der Zeitlichen Abstände h_i der n Fahrzeuge.

$$q = \frac{n}{T} = \frac{n}{\sum h_i} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum h_i} = \frac{1}{\bar{h}} \quad [7]$$

\bar{h} = mean time headway

q : Die Verkehrsstärke

n : Anzahl der Fahrzeuge in dem Straßenabschnitt

T : Zeitabstand

h_i : Zeitlicher Abstand zwischen dem Fahrzeug i und dem Fahrzeug $i + 1$

2.3.2 Verkehrsdichte

Die Verkehrsdichte eines Verkehrsflusses ist die Anzahl der Fahrzeuge, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt auf einer Einheit der Straßenlänge befinden. Genau wie der Durchfluss kann sich die Dichte auf eine gesamte Straße, eine Fahrbahn oder einen Fahrstreifen beziehen. Übliche Einheiten für die Dichte sind Fahrzeug/km und Fahrzeug/m. Im Vergleich zum Durchfluss ist die Bestimmung der Dichte weitaus schwieriger. Eine Methode sind Foto-

oder Videoaufnahmen aus einem Flugzeug oder von einem hohen Aussichtspunkt aus. Aus einem Foto erhält man die Dichte einfach durch Zählen von m = die Anzahl der Fahrzeuge auf einem bestimmten Straßenabschnitt der Länge X . (5)

Die Dichte ist also eine momentane Größe, die für eine bestimmte Zeit t für eine Region X gilt:

$$k = \frac{m}{X} \quad [8]$$

k : Die Verkehrsdichte

X : Die Straßenlänge ist gleich der Summe der " Räumlichen Abstände " s_i

m : Anzahl der Fahrzeuge

$$k = \frac{m}{X} = \frac{m}{\sum s_i} = \frac{1}{\frac{1}{m} \sum s_i} = \frac{1}{\bar{s}} \quad [9]$$

\bar{s} = mittlerer räumlicher Abstand

S_i : Der räumliche Abstand zwischen dem Fahrzeug i und dem Fahrzeug $i + 1$

k : Die Verkehrsdichte

X : Die Straßenlänge ist gleich der Summe der " Räumlichen Abstände " S_i

m : Anzahl der Fahrzeuge

Bei zwei- oder dreidimensionalen Strömen kann die Dichte definiert werden, indem man einen Bereich oder ein Volumen betrachtet und die Anzahl der Fahrzeuge m zählt, die diesen Bereich oder dieses Volumen zu einem bestimmten Zeitpunkt t belegen. Die durchschnittliche Durchfahrtsentfernung kann in diesen Fällen als die durchschnittliche Fläche/das durchschnittliche Volumen interpretiert werden, die/das von einem Fahrzeug in dem zwei- oder dreidimensionalen Strom belegt wird. (12)

Hinweis: Streng genommen sind die Gleichungen (4) und (5) nur dann gültig, wenn die Periode T und die Abschnittslänge X genau einer ganzen Anzahl von Durchläufen entsprechen. In der Praxis ist dies nur dann relevant, wenn die verwendeten Perioden T oder Abschnittslängen X relativ kurz sind. (12)

2.3.3 Geschwindigkeit

Es gibt zwei Möglichkeiten, Durchschnittsgeschwindigkeiten zu erhalten.

➤ Lokale oder zeitliche Geschwindigkeit

Die Durchschnittsgeschwindigkeit kann auf verschiedene Weise bestimmt werden:

Angenommen, wir messen die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge, die während eines bestimmten Zeitraums an einem Querschnitt vorbeifahren. Das arithmetische Mittel dieser Geschwindigkeiten wird als "lokale Durchschnittsgeschwindigkeit" bezeichnet (oder als punktuelle Durchschnittsgeschwindigkeit, die in Anlehnung an die lokale Geschwindigkeit mit dem Index L bezeichnet wird). (13)

$$v_L = \frac{1}{n} \sum_i^n v_i$$

v_L : Lokale Geschwindigkeit

v_i : Geschwindigkeit des Fahrzeugs i

n : Anzahl der Fahrzeuge

➤ Momentane oder Räumliche Geschwindigkeit

Angenommen, wir kennen die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge, v_j , die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt auf einem Straßenabschnitt befinden. Das arithmetische Mittel dieser Geschwindigkeiten ist die sogenannte "momentane Durchschnittsgeschwindigkeit" (bezeichnet mit dem Index M, bezogen auf den Momentanen) oder "räumliche Durchschnittsgeschwindigkeit". (13)

$$v_M = \frac{d}{\sum \frac{t_i}{m}}$$

v_M : Momentane Geschwindigkeit

d : Die Strecke

t_i : Die beobachteten Fahrtzeiten

m : Anzahl der Fahrzeuge

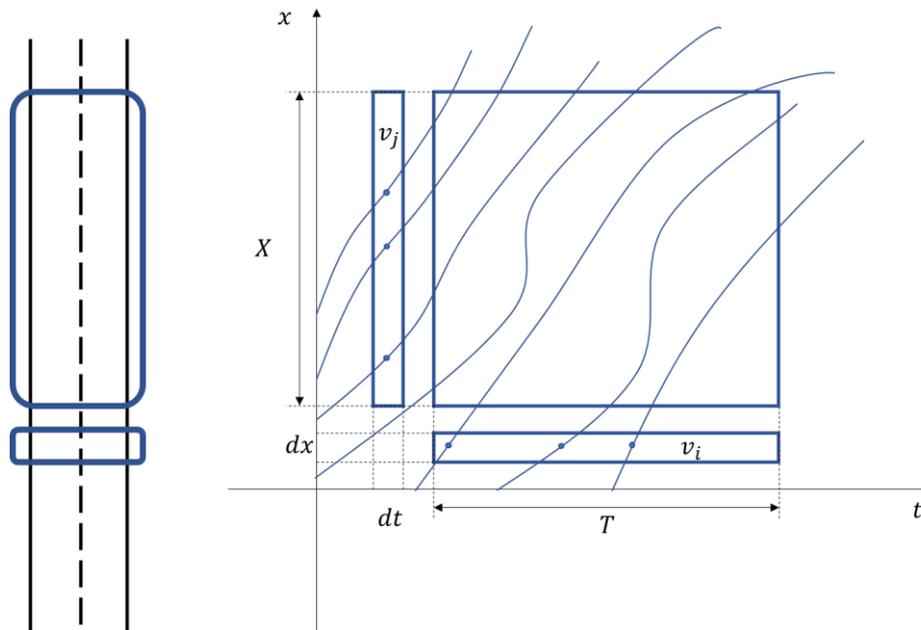


Abbildung 6: Die Geschwindigkeit im Zeit-Raum-Diagramm (8)

2.4 Fundamentaldiagramm

2.4.1 Ursprung des Fundamentaldiagramms

Das Fundamentaldiagramm stellt eine Gleichgewichtsbeziehung zwischen dem Verkehrsaufkommen und der Verkehrsdichte dar. Seit seiner Entstehung hat diese mehrere Entwicklungen durchlaufen. Im Jahr 1935 legte Greenshields die Grundlage für die meisten klassischen Arbeiten über grundlegende Diagramme, die sich nur auf Erfahrung und Beobachtung und nicht auf eine Theorie der Argumentation stützen. Diese Diagramme werden als empirisch bezeichnet. Laut Greenshields' Artikel aus dem Jahr 1935 beschrieb er eine lineare Beziehung zwischen der Dichte und der Durchschnittsgeschwindigkeit, die auf experimentell abgeleiteten Daten basierte. Dann lieferten die Forscher Lighthill und Whitham 1955 eine neue Theorie, die erklärt, wie der Verkehrsfluss auf langen, überlasteten Straßen mithilfe eines Modells der Fluidynamik beschrieben wird. Tatsächlich stammt die Bezeichnung "fundamentales Diagramm" von Lighthill und Whithams Grundannahme, die einer eindimensionalen Kurve der Flusskonzentration folgt. Dann begannen die Verkehrsingenieure, von einem Diagramm zu sprechen, das diese Kurve darstellt, dem "Fundamentaldiagramm"

2.4.2 Die allgemeine Form eines Fundamentaldiagramms

Verkehrsstärke q , Verkehrsdichte k und Durchschnittsgeschwindigkeit v sind die Parameter, die in der Regel den Verkehrsfluss beschreiben. Das Fundamentaldiagramm stellt die funktionale Beziehung zwischen diesen drei Parametern dar. Diese 3 Parameter werden durch die Fundamentalbeziehung

$q = k \cdot v$ miteinander verknüpft.

Das Fundamentaldiagramm wird durch die Kenngrößen Wunschgeschwindigkeit v_0 , maximale Verkehrsdichte bei stehendem Verkehr k_c , maximal mögliche Verkehrsstärke q_{max} und die zu q_{max} zugehörige optimale Verkehrsdichte k_c charakterisiert.

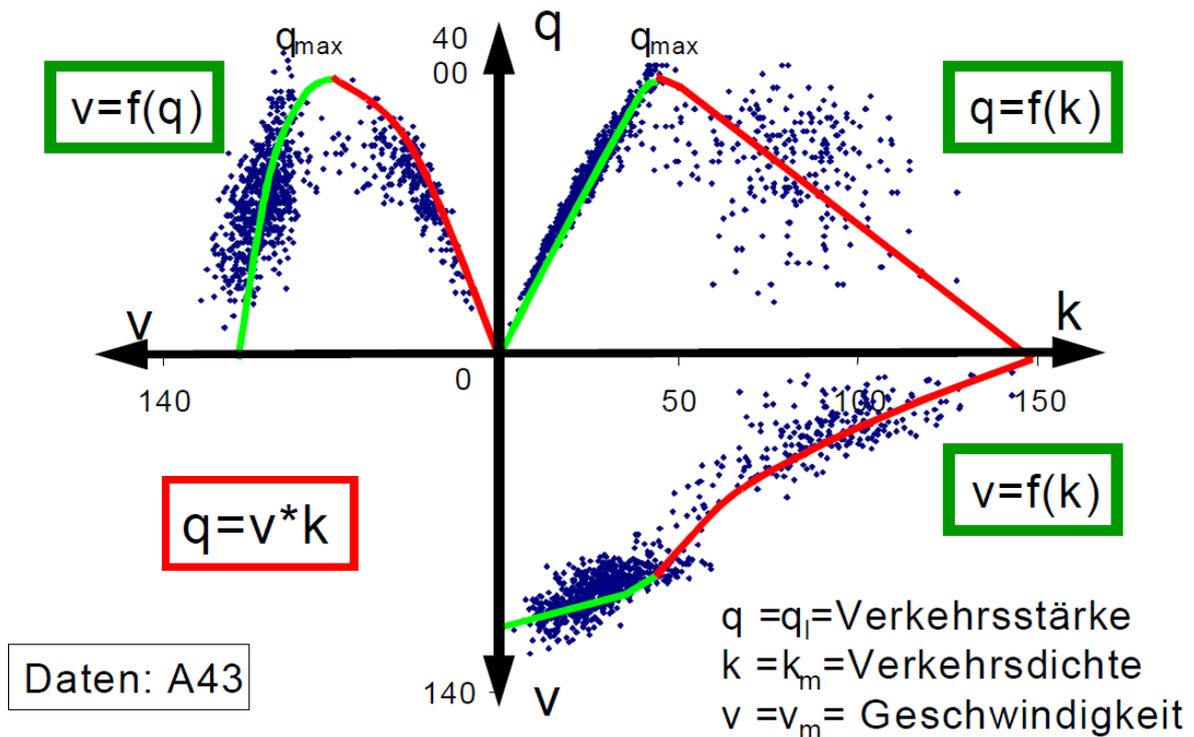


Abbildung 7: Fundamentaldiagramm zwischen q , k und v (15)

2.4.3 Verhältnis Verkehrsdichte zur Durchschnittsgeschwindigkeit

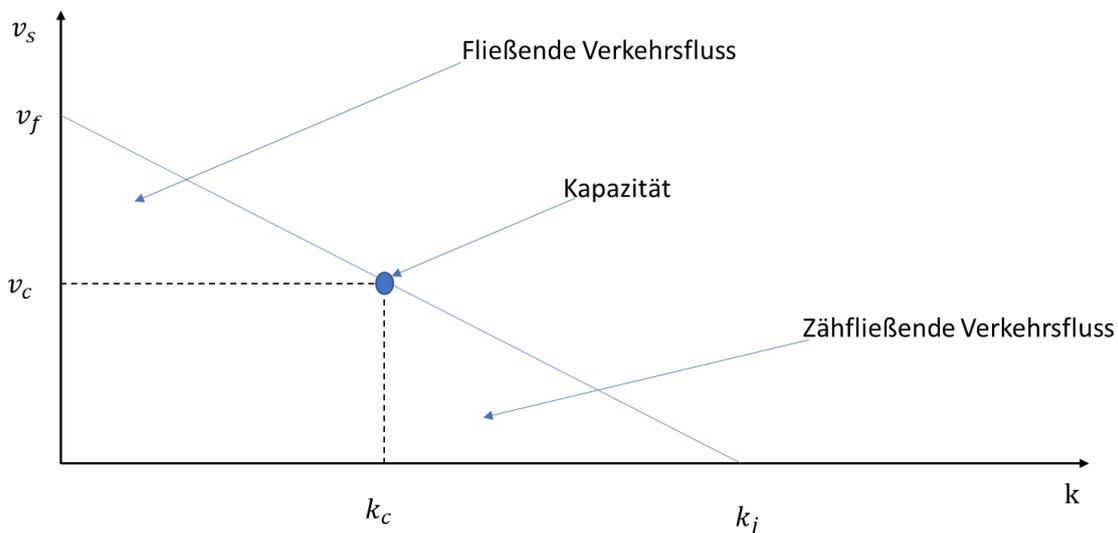


Abbildung 8 : Ein fundamentales Diagramm, das die Verkehrsdichte k mit der Mittlere Räumliche Geschwindigkeit in Beziehung setzt

Diese Grafik zeigt die Gleichgewichtsbeziehung zwischen der räumlichen mittleren Geschwindigkeit und der Verkehrsdichte und ist intuitiv leicht zu verstehen.

- Die Verkehrsdichte ist zwischen 0 und der maximalen Verkehrsdichte k_j begrenzt
- Die räumliche mittlere Geschwindigkeit ist zwischen 0 und der maximalen mittleren Geschwindigkeit oder frei Fließgeschwindigkeit v_f , begrenzt,
- Wenn die Verkehrsdichte zunimmt, nimmt die durchschnittliche räumliche mittlere Geschwindigkeit monoton ab
- Es gibt einen kleinen Bereich mit geringen Verkehrsdichten, in dem die mittlere räumliche Geschwindigkeit unverändert bleibt und mehr oder weniger der freien Fließgeschwindigkeit entspricht

2.4.4 Verhältnis von Verkehrsstärke zur Verkehrsdichte

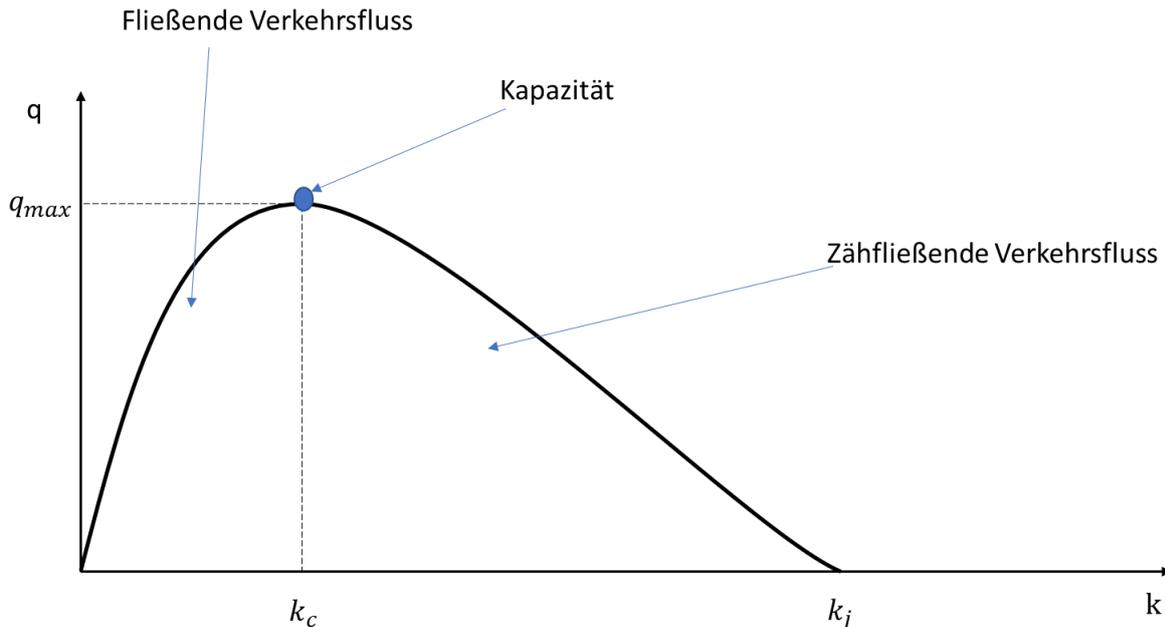


Abbildung 9: Ein fundamentales Diagramm, das die Verkehrsdichte k mit dem Verkehrsstärke q in Beziehung setzt

Die wohl häufigste Form des Fundamentaldiagramms ist das Diagramm Verkehrsstärke vs. Verkehrsdichte. Seine Ursprünge gehen auf die Vorläuferarbeiten von Lighthill und Whitham zurück, die es als Fluss-Konzentrations-Kurve bezeichneten.

Die bemerkenswerten Merkmale dieser Art von Fundamentaldiagramm sind folgende:

- Bei mäßig niedrigen Verkehrsdichten (d. h. unterhalb der kritischen Verkehrsdichte k_c) nimmt der Verkehrsstärke mehr oder weniger linear zu (dies wird als der Fließende Verkehrsfluss des Fundamentaldiagramms bezeichnet),
- Nahe der kritischen Verkehrsdichte k_c kann das Fundamentaldiagramm leicht abknicken, da schnellere Fahrzeuge von langsameren Fahrzeugen verstopft werden, was die Fließgeschwindigkeit des freien Verkehrs verringert (Newell., 1993)
- Bei der kritischen Verkehrsdichte k_c erreicht der Verkehrsfluss ein Maximum, das als Kapazität (Greenshields, 1935) (Whitham, 1955.) q_{max} bezeichnet wird,
- Im Stauregime (d. h. bei Verkehrsdichten oberhalb der kritischen Verkehrsdichte) beginnt sich die Verkehrsstärke mit zunehmender Verkehrsdichte zu verschlechtern, bis die Stauverkehrsdichte k_j erreicht ist und der Verkehr zum Stillstand kommt, was eine Verkehrsstärke von Null zur Folge hat

2.4.5 Verhältnis der Verkehrsstärke zur Durchschnittsgeschwindigkeit

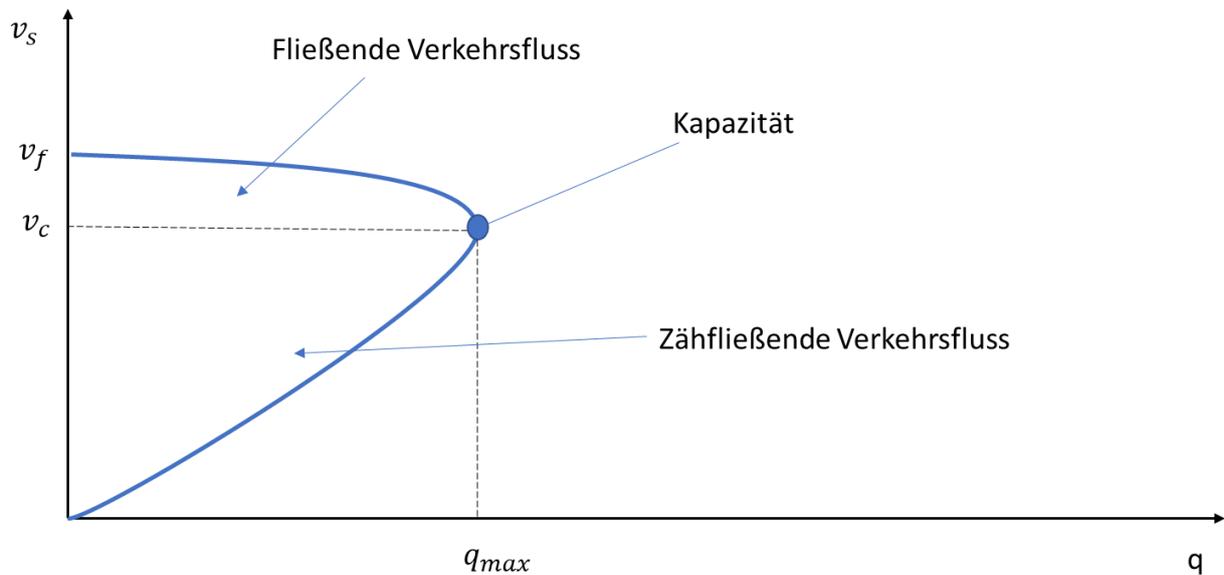


Abbildung 10: Ein fundamentales Diagramm, das die Mittlere Räumliche Geschwindigkeit v mit dem Verkehrsstärke q in Beziehung setzt

Im Gegensatz zum fundamentalen Diagramm $v=f(k)$ stellt die Kurve der räumlichen Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke keine Funktion im strengen mathematischen Sinne mehr dar: Für jeden Wert des Verkehrsflusses gibt es zwei verschiedene Durchschnittsgeschwindigkeiten, nämlich eine im freien Fließregime (oberer Zweig) und eine im Stauregime (unterer Zweig).

Manche Menschen, z. B. Wirtschaftswissenschaftler, die den Fluss zur Darstellung der Verkehrsnachfrage verwenden, finden diese grundlegende Art von Diagramm leicht verständlich. (8)

3 Knotenpunkte und Lichtsignalanlagen

3.1 Grundlagen der Knotenpunkte

Als Knotenpunkte werden bauliche Anlagen bezeichnet, die der Verbindung von zwei oder mehreren Straßen dienen.

Wird eine Straße an eine durchgehende Straße angeschlossen, dann entsteht eine Einmündung (dreiarmer Knotenpunkt).

Ein Knotenpunkt mit mehr als drei Knotenpunktarmen ist eine Kreuzung; sie wird von mindestens zwei durchgehend befahrbaren Straßen gebildet.

Die wichtigste Unterscheidung an Knotenpunkten wird durch das Verkehrsmanagement an (Unter-) Knotenpunkten markiert. Man unterscheidet zwischen Bereichen, in denen nur Zu- und Abfahrtsprozesse sowie Verflechtungen stattfinden, und solchen, in denen auch kreuzende Verkehrsströme auftreten. Eine Sonderform des Knotenpunkts ist der Kreisverkehr, bei dem drei oder mehr Straßen, die sich an einer Kreuzung treffen, durch eine Kreisfahrbahn miteinander verbunden werden. (16)

3.1.1 Arten von Knotenpunkten

Es gibt zwei Arten von Knotenpunkten, nämlich Schnittpunkte auf derselben Ebene, die als plangleiche Schnittpunkte bezeichnet werden und Schnittpunkte auf verschiedenen Ebenen, die als planfreie Knotenpunkte bezeichnet werden.

3.1.2 Knotenpunktformen

- Plangleiche Knotenpunkte
 - T-Knotenpunkt

Als T-Knotenpunkt wird eine Kreuzung mit drei Armen bezeichnet, bei der ein Arm ungefähr die Verlängerung eines anderen Arms ist und der dritte Arm diese Verlängerung in einem Winkel zwischen 75° und 105° schneidet. (16)

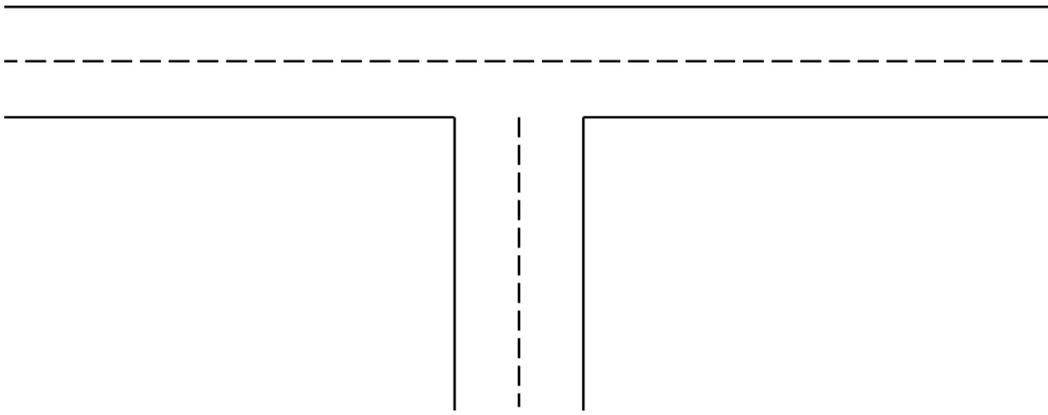


Abbildung 11: T-Knotenpunkt

- Y-Knotenpunkt

Es handelt sich um eine Kreuzung mit drei Zweigen, bei der ein Zweig in der Verlängerung eines anderen liegt und der dritte Zweig schneidet, wobei diese Verlängerung in einem Winkel von weniger als 75° oder mehr als 105° verläuft. (16)

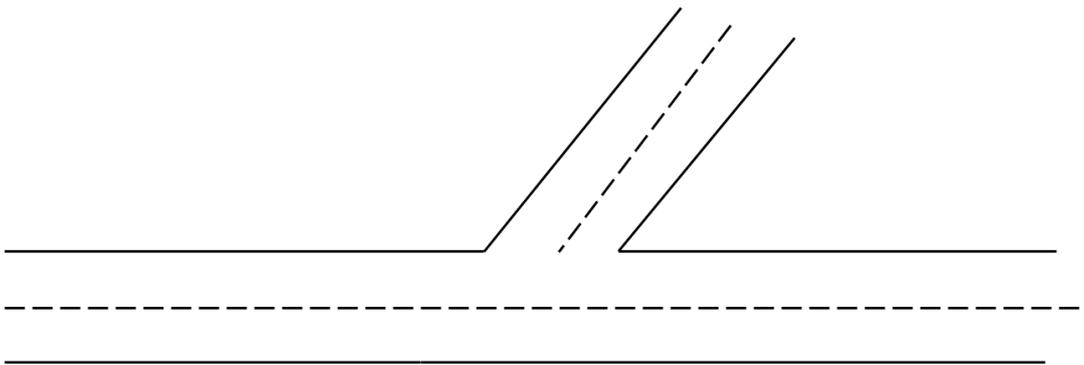


Abbildung 12: Y-Knotenpunkt

- Einfache Kreuzung

Dies ist eine Kreuzung mit vier Zweigen, bei der zwei der Zweige ungefähr in der Verlängerung der beiden anderen Zweige liegen und der Winkel zwischen diesen Verlängerungen 75° oder mehr, aber weniger als 105° beträgt. (16)

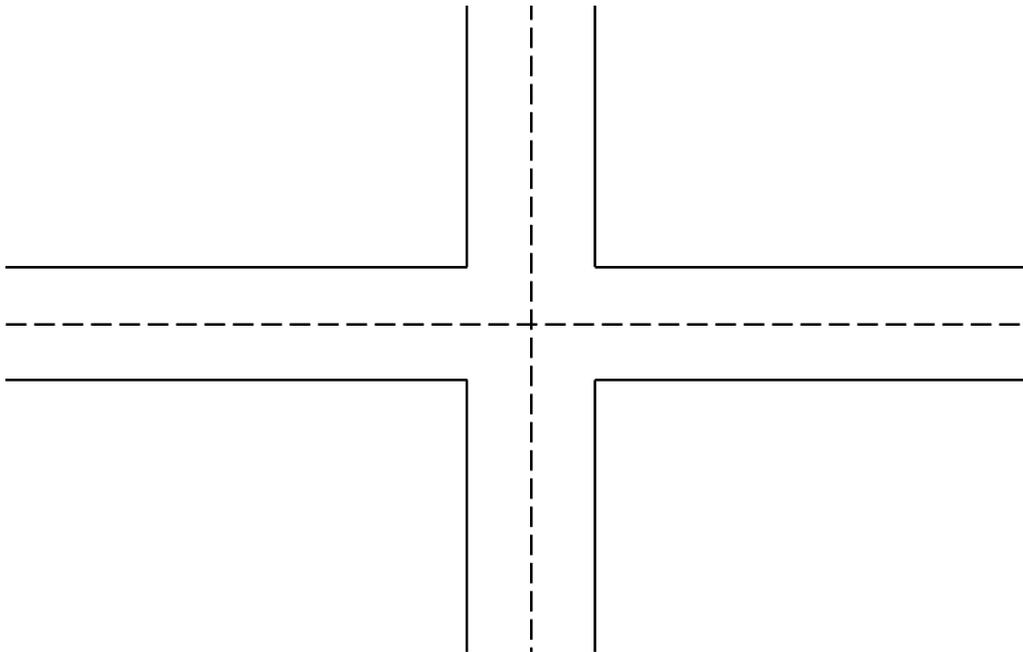


Abbildung 13: Einfache Kreuzung

- X-förmige Knotenpunkt

Dies ist eine vierarmige Kreuzung, bei der zwei Arme ungefähr in der Verlängerung der beiden anderen Arme liegen und der Knotenpunktwinkel dieser beiden Verlängerungen weniger als 75° oder mehr als 105° beträgt. (16)

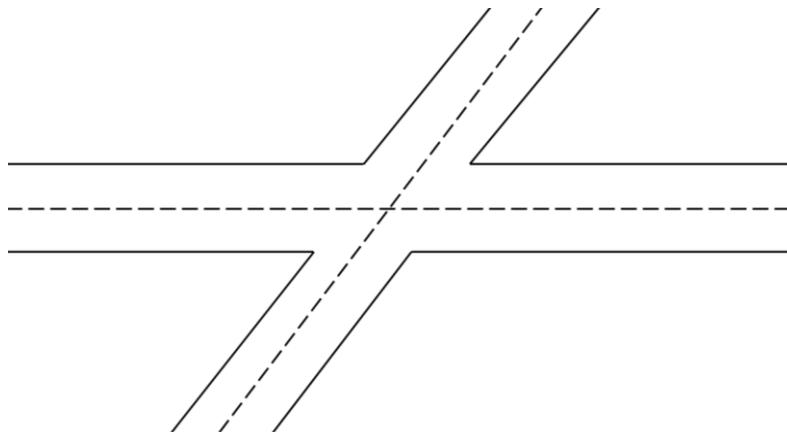


Abbildung 14: X-Knotenpunkt

- Knotenpunkt mit mehreren Armen

Eine Kreuzung mit mehreren Ästen ist eine Kreuzung mit fünf oder mehr Ästen.

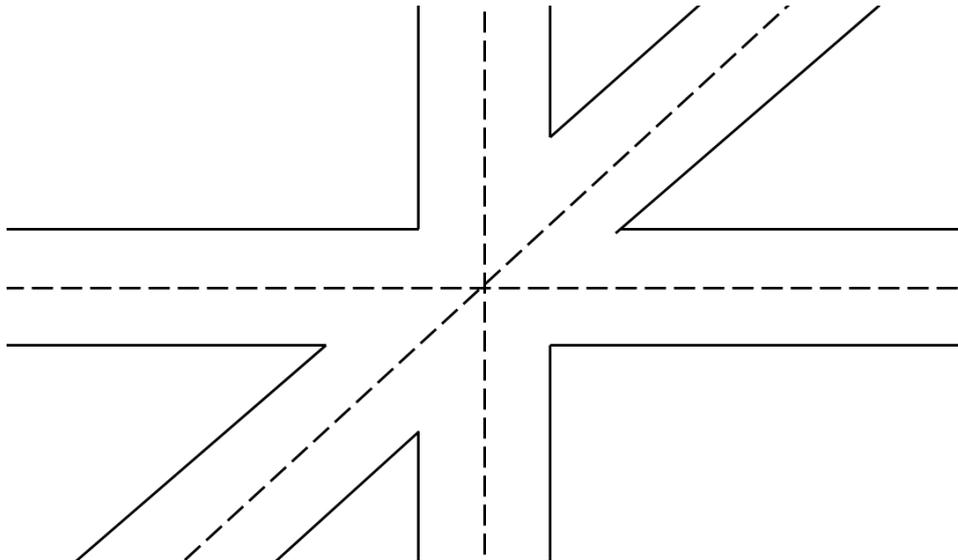


Abbildung 15: Knotenpunkt mit mehreren Armen

- Kreisverkehr

Ein Kreisverkehr ist eine Kreuzung mit drei oder mehr Ästen, bei der die Ströme auf einer Einbahnstraße, die eine Mittelinsel umgibt, zusammenlaufen und dann wieder auseinanderlaufen; der Verkehr auf dieser Fahrbahn läuft gegen den Uhrzeigersinn (in Ländern mit Linksverkehr läuft der Verkehr im Uhrzeigersinn).

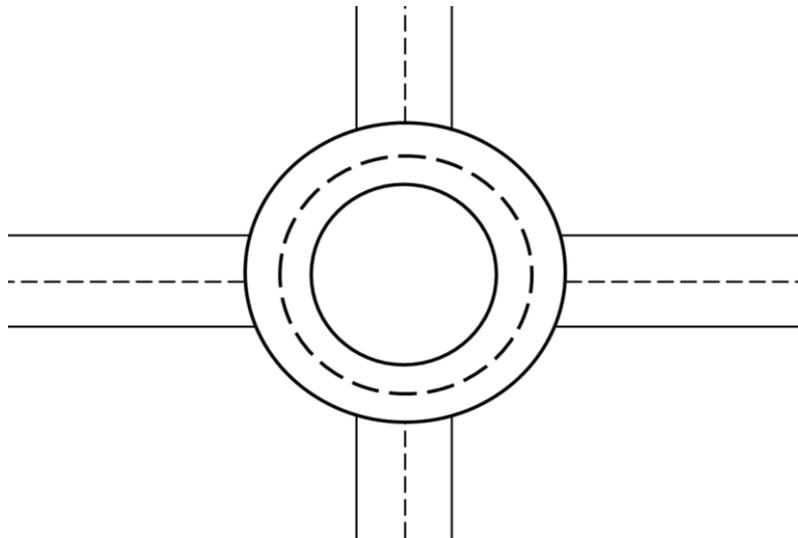


Abbildung 16: Kreisverkehr

Abbildung 16 zeigt die Anwendungsbereiche von Kreisverkehren. Sie lassen sich nach der Größe des Kreisdurchmessers, der Anzahl der Fahrspuren auf der Kreisfahrbahn und den Zufahrtsstraßen sowie nach ihrer Lage und ihrer städtebaulichen Einbindung klassifizieren.

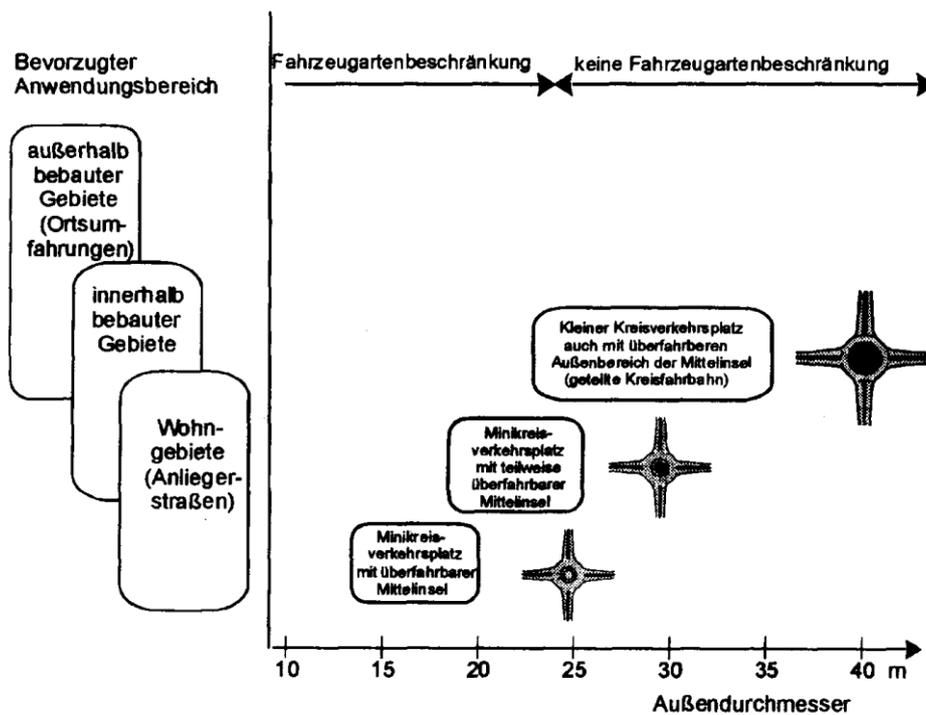


Abbildung 17: Anwendungsbereiche von Kreisverkehrsplätzen (16)

Bei dieser Art von Kreuzung fahren die Fahrzeuge auf einer Kreisfahrbahn gegen den Uhrzeigersinn um eine Mittelinsel herum. Er verbindet in der Regel drei oder mehr Straßen, die an dieser Kreuzung aufeinandertreffen, was bedeutet, dass die Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn Vorrang vor den Fahrzeugen haben, die von allen Zufahrtsstraßen kommen. Auf Kreisverkehren entfallen also die Kreuzungsprozesse, da nur die Ein- und Ausfahrten bzw. bei mehrspurigen Kreisverkehren die Verschränkungen zulässige Bewegungsprozesse sind. Sie sind besonders geeignet, wenn die Belastungen der verbundenen Straßen in etwa gleich hoch sind.

3.1.3 Konfliktpunkte an Kreuzungen

In der traditionellen Analyse von Verkehrskonflikten gibt es drei grundlegende Arten von Konflikten zwischen Fahrzeugen: Einmündungskonflikte, Abweichungskonflikte und Überquerungskonflikte. Für diese Arbeit werden wir eine vierte Art von Konflikten einbeziehen: sequenzielle Konflikte. Die Konflikte Fahrzeug/Umgebung und Fahrzeug/Fußgänger werden vernachlässigt. (17)

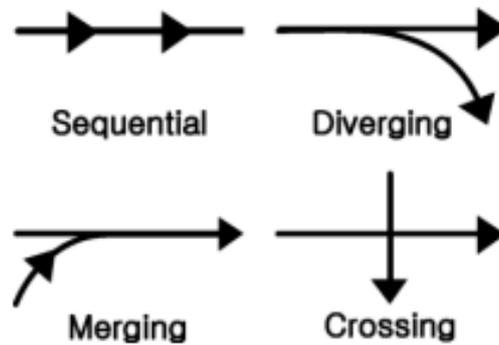


Abbildung 18: Konfliktpunkte (17)

Überquerung Konflikt (Crossing)

Überquerungskonflikte treten auf, wenn Fahrzeuge aus unterschiedlichen Richtungen versuchen, sich an einer Stelle zu begegnen. Überquerungskonflikte gelten als die gefährlichste Art von Konflikten und sind ein wichtiges Anliegen bei der Gestaltung von Kreuzungen. (17)

Einmündung Konflikt (Merging)

Einmündungskonflikte entstehen, wenn Fahrzeuge aus verschiedenen Spuren oder Richtungen auf einer Spur münden und sich in eine Richtung bewegen. Dadurch entsteht ein Engpass und der Verkehr muss von einem größeren, weniger überfüllten Raum in einen engeren, stärker überfüllten Raum wechseln. (17)

Abweichung Konflikt (Diverging)

Abweichungskonflikte entstehen, wenn sich der Verkehrsstrom, der in eine Richtung fließt, in mehrere Richtungen aufteilt. Sie werden im Allgemeinen als die am wenigsten problematischen der vier Konfliktarten angesehen. Divergierende Straßen schaffen einen umgekehrten Engpass, da sich der Verkehr von einem überfüllteren und eingeschränkten Raum in einen offeneren Raum bewegt. An sich ist dies kein Problem. Allerdings neigen Fahrzeuge dazu, langsamer zu werden, wenn sie die Richtung ändern oder Navigationsentscheidungen treffen. So kann der nachfolgende Verkehr, der sich schneller bewegt, die negativen Auswirkungen des vorhergehenden Verkehrs, der sich langsamer bewegt, zu spüren bekommen. In diesem Sinne ähneln divergierende Konflikte sequenziellen Konflikten. (17)

Sequenzielle Konflikte (Sequential)

Sequenzielle Konflikte treten zwischen zwei Fahrzeugen auf, die sich nacheinander (eines nach dem anderen) bewegen. Zu einem Unfall kommt es nur, wenn das nachfolgende Fahrzeug schneller fährt als das führende Fahrzeug. Wenn das vordere Fahrzeug steht, handelt es sich um einen Warteschlangenkonflikt aus dem englischen Queuing conflict). (17)

3.2 Lichtsignalanlage (LSA)

Dies ist eines der Mittel zur Kontrolle und Organisation des Straßenverkehrs an Knotenpunkten (Verringerung von Konfliktpunkten). Es werden drei Farben verwendet:



3.3.1 Ursprung

Die ersten Straßenschilder tauchten im 19. Jahrhundert in Form von roten Scheiben auf, die zum Anhalten von Zügen verwendet wurden. Im Laufe der Zeit wurden die Verkehrszeichen weiterentwickelt. Zunächst wurden sie in Form einer drehbaren Gaslaterne mit den Komplementärfarben Rot und Grün verwendet, die von einem Polizisten bedient werden musste. Dann kamen die ersten zweifarbigen elektrischen Verkehrsampeln zu Beginn des Ersten Weltkriegs in den USA auf. Etwas später wurden die elektrischen Ampeln weiterentwickelt und durch Hinzufügen einer Zwischenphase, die durch die Farbe Gelb-Orange gekennzeichnet war, dreifarbig. Die Wahl dieser Farben beruht auf der Emotionalität und Aufmerksamkeit der Menschen; Rot-orange Signale, um eine Gefahr oder ein Verbot zu signalisieren, und die Farbe Grün, um den Durchgang zu erlauben. (18)

3.3.2 Grundprinzipien

Ampeln werden an Knotenpunkten aufgestellt, um den Verkehrsteilnehmern auf jeder Fahrbahn anzuzeigen, ob die Durchfahrt verboten oder erlaubt ist. Bei roter Farbe müssen die Verkehrsteilnehmer auf dieser Achse zwingend und sofort vor einer Linie anhalten, die in der Regel auf dem Boden markiert ist. Das können Autofahrer, Radfahrer oder auch Fußgänger sein, die von einem Bürgersteig auf einen anderen wechseln. (16)

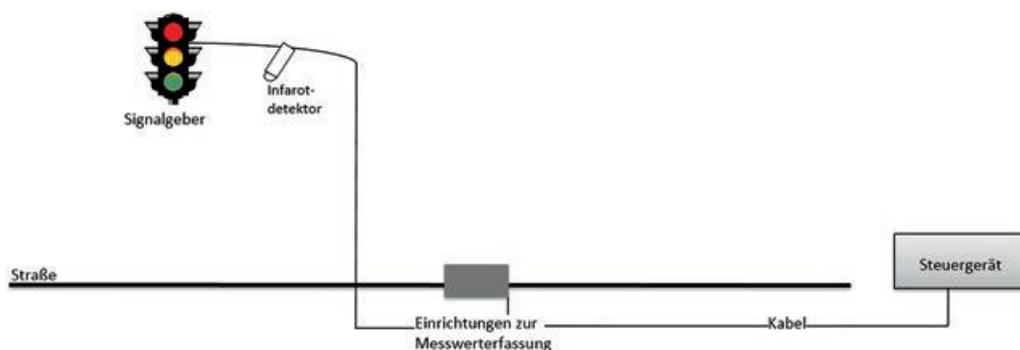


Abbildung 19: Skizze einer Lichtsignalanlage

3.3.3 Ziel

Die verschiedenen Arten von Ampeln dienen in erster Linie dazu, die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer zu gewährleisten und den Fluss der Verkehrsströme zu organisieren und zu erleichtern. (16)

3.3.4 Funktionsweise von Phasen

Eine Phase ist die Zeit, die eine Richtung benötigt, um zu funktionieren. In einem Knotenpunkt mit vier Spuren/Einfahrten und Signalen auf jeder Spur schaltet eine Spur beispielsweise auf Grün (für vorbeifahrende Autos), dann auf Gelb, um anzukündigen, dass das Signal bald auf Rot wechselt, und dann auf die Zeit, in der alle anderen Spuren noch ein rotes Signal haben. Zusammenfassend kann man also sagen, dass eine Phase die Zeit ist, in der ein einzelner Fahrstreifen in Betrieb ist, wenn er grün und dann gelb ist und während aller anderen Fahrstreifen rot sind. (16)

Formel: Grünes Licht + gelbes Licht + die Zeit, in der die anderen Spuren noch rot sind.

3.3.5 Farbwechselzeit

Dies ist die Zwischenzeit, um den Fahrzeugen zu signalisieren, dass die Farbe der Ampel von Grün auf Rot wechseln wird und sie bald sofort anhalten müssen. Dies wird als Farbwechselzeit bezeichnet. Sie wird mit der Farbe Gelb bezeichnet. Sie nimmt in der Regel 3 bis 5 Sekunden Zeit in Anspruch. Diese Zeit hat den Vorteil, dass es beim abrupten Anhalten nur selten zu Zusammenstößen kommt. Es ist tolerierbar, vorbeizufahren, wenn der Fahrer nicht rechtzeitig anhalten kann. (16)

3.3.6 Alles rote Zeit

Dies ist die Zeit, in der alle Spuren rot sind. Um den Fahrzeugen einer bestimmten Spur den Weg freizugeben, muss der Knotenpunkt leer sein. Während dieser Zeit geht es also darum, den Verkehr auf allen Spuren zu blockieren, bevor eine neue Phase einer bestimmten Spur gefahrlos beginnen kann. (16)

3.3.7 Zeit zwischen grünen Signalen

Diese Zeit beginnt mit dem Ende des grünen Signals eines bestimmten Fahrstreifens und endet mit dem Beginn des grünen Signals eines anderen Fahrstreifens. Sie wird auch als Nachfolgezeit der Farbe Grün bezeichnet. (16)

Formel: Zeit zwischen grünen Signalen = gelb + alles rot.

3.3.8 Sättigungsfluss (S)

Wenn die Fahrzeugschlange beginnt, sich gleichzeitig und kontinuierlich aus dem Knotenpunkt herauszubewegen, bis sie ihre maximale Sättigung an vorbeifahrenden Fahrzeugen erreicht hat, wird dies als Sättigungsdurchschnitt bezeichnet. (16)

Die Einheit von S ist = Fahrzeug/Stunde/Spur.

3.3.9 Zeit der effektiven Grünphase

Dies ist genau die Zeit des " Sättigungsflusses ". Das bedeutet, dass das Maximum der Sättigung des Fahrzeugdurchlaufs erreicht ist. Die folgende Abbildung erklärt:

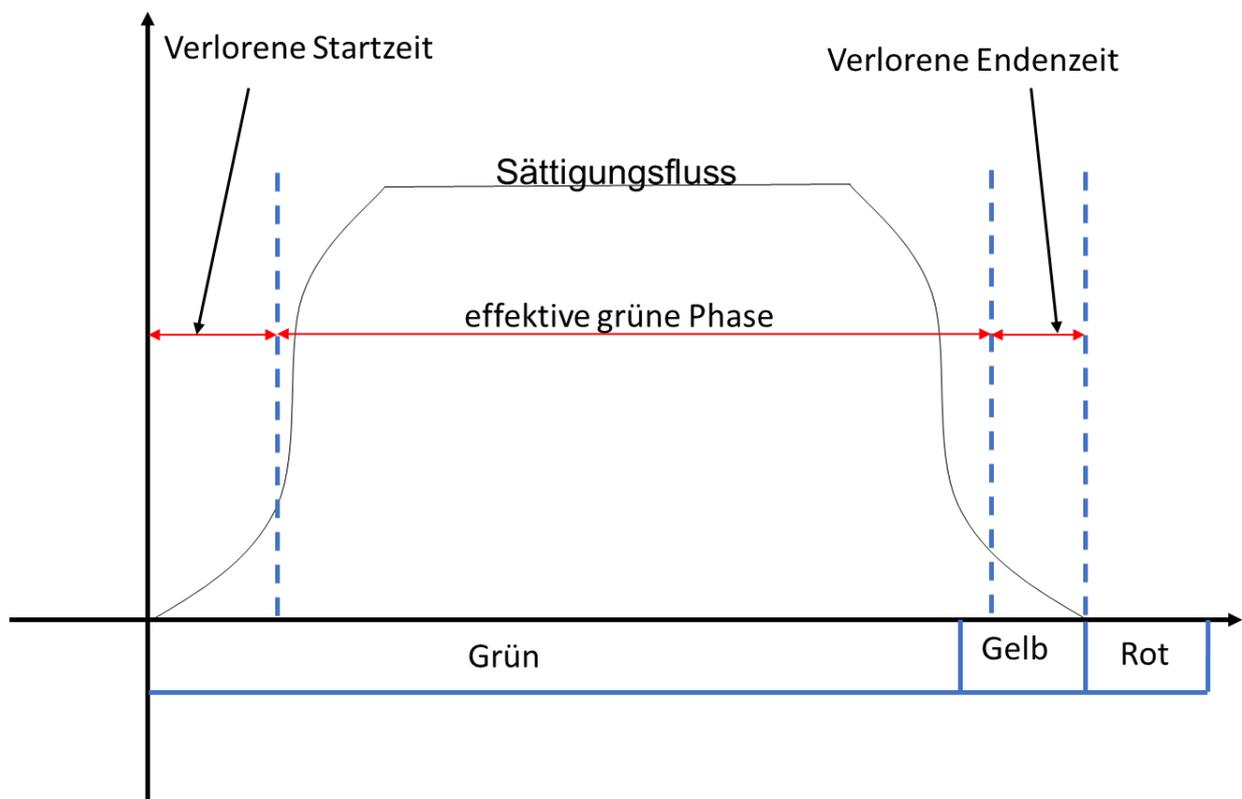


Abbildung 20: Abfluss der Fahrzeugschlange über die Haltelinie (19)

4 Verkehrssimulation

Die Computersimulation des Verkehrs ist eine weit verbreitete Methode in der Forschung zur Verkehrsmodellierung, Planung und Entwicklung von Verkehrsnetzen und -systemen. Weltweit wächst das Interesse an Autoverkehrssystemen, und die Modellierung willkürlich komplexer Verkehrssysteme ist ein schwieriges Problem. In diesem Kapitel wird ein Überblick über einige der Softwareanwendungen zur Verkehrssimulation, ihre Merkmale und die Probleme, mit denen diese Anwendungen konfrontiert sind gegeben.

4.1 Simulation

„Ein möglichst realitätsnahes Nachbilden von Geschehen der Wirklichkeit. Aus Sicherheits- und Kostengründen ist es für fast alle konkreten Problemkreise notwendig, sie aus der Realität zu lösen und abstrakt zu behandeln; d.h. durch Abstraktion wird ein Modell geschaffen, an dem zielgerichtet experimentiert wird. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden anschließend wieder auf das reale Problem übertragen.“ (20)

4.2 Verkehr

Verkehr kann als jede Form der Bewegung zwischen mehreren Punkten definiert werden, unabhängig von der Art der Bewegung. Tatsächlich kann man zwei große Arten von Verkehr unterscheiden. Die erste Gruppe ist die Gruppe der öffentlichen Verkehrsmittel, wie Züge, Busse, Straßenbahnen usw. Die zweite Gruppe ist die Gruppe des Individualverkehrs: Autos, Lastwagen, Motorräder und Fahrräder.

Die letztgenannte Gruppe bereitet uns die meisten Probleme. Die Bewegungen des Individualverkehrs sind für einen außenstehenden Beobachter auf den allerersten Blick chaotisch und willkürlich. Nur auf den ersten Blick sind die Bewegungen der verschiedenen Verkehrsteilnehmer unvorhersehbar. Auf den nächsten Blick erkennen wir wiederkehrende Strukturen und Muster, die uns helfen, das Gesamtkonzept des Verkehrs besser zu erfassen. (21)

4.3 Verkehrssimulation

Eine Verkehrssimulation ist eine Simulation, die sich auf den Verkehr bezieht. Im Allgemeinen kann jedes Verkehrssystem simuliert werden, wie z. B. Straßenverkehr, Schiffsverkehr, Schienenverkehr usw. Die Simulation von Verkehrssystemen kann in der Regel auf der Grundlage von Verkehrsdaten durchgeführt werden.

Die Parameter, die jedes Verkehrssystem beeinflussen, sind unterschiedlich, weshalb die Anforderungen an die Simulationen der verschiedenen Verkehrssysteme völlig verschieden sind. So spielt beispielsweise das Wetter eine wichtige Rolle bei der Simulation von

Schiffsverkehr, während es bei Schienenverkehr und Straßenverkehr nur einen sehr geringen Einfluss hat.

Dieses Masterprojekt befasst sich ausschließlich mit dem Straßenverkehrssystem. Es ist sehr schwierig, dieses System in Form eines Simulationsmodells zu beschreiben. Ein Simulationsmodell ist ein Programm, das für Eingabedaten und ein Modell mithilfe eines geeigneten Algorithmus Berechnungen durchführt und die Ergebnisse ausgibt. (22)

Die Eingabedaten einer Verkehrssimulation sind die typischen Parameter des Straßenverkehrs wie die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs, der Abstand zwischen den Fahrzeugen, der Fahrzeugtyp etc.

Der menschliche Faktor ist bei der Verkehrssimulation sehr wichtig, da sich die Einstellung des Fahrers in seinem Fahrstil und seinem Fahrverhalten widerspiegelt. Jeder Mensch hat einen anderen persönlichen Charakter und das wirkt sich auf sein Handeln in einer bestimmten Situation aus, das sich von dem eines anderen Fahrers in der gleichen Situation stark unterscheiden kann. All dies beeinflusst den Verkehrsfluss. Um das menschliche Verhalten als Teil des Berechnungsmodells in eine Simulation zu implementieren, wurden verschiedene Verhaltensmodelle entwickelt, die auf Beobachtungen basieren, wie z. B. das Verhaltensmodell von Wiedemann. (23)

4.4 Vergleich von Simulationssoftware

Es gibt eine große Vielfalt an Verkehrssimulatoren, die auf Multiagentensystemen oder zellularen Automaten basieren. Die meisten dieser Anwendungen haben jedoch einen kommerziellen Zweck und liefern daher nur sehr wenige Entwurfsdetails.

Neben diesen Systemen finden wir auch Unternehmenssoftware die auf dem Multi-Agenten-Paradigma basieren. Dennoch sind diese Tools spezifischen Fragestellungen gewidmet, wie z. B. gezielten Studien zur Fahrerpsychologie, zur Ergonomie des Fahrzeuginnenraums oder auch massiven mikroskopischen Simulationen. Ihre Architekturen sind optimiert, die Verhaltensweisen sind dediziert und kaum erweiterbar. In ähnlicher Weise konzentriert sich die DIVAs-Plattform stärker auf Probleme mit der Sicht des Agenten. Andere Arbeiten konzentrieren sich auf das Problem der Kollisionsvermeidung in autonomen Fahrzeugen.

Schließlich gibt es einige Open-Source-Alternativen wie SUMO. SUMO ist auf einer agentenbasierten Architektur basiert. Es ermöglicht die Nutzung von geografischen Daten (GIS). Es hat auch den Vorteil, dass es eine große Anzahl von Fahrzeugen simulieren kann, allerdings sind die Simulationsmechanismen nicht flexibel genug. Fahrzeuge haben nur eine geringe Anzahl von Verhaltensweisen, die sich auf ein Modell zur Fahrzeugverfolgung und einen Mechanismus zum Spurwechsel reduzieren lassen. (24)

4.4.1 Verkehrssimulationssoftware

In diesem Kapitel werden mehrere Arten von Verkehrssimulationssoftware vorgestellt, die in dem Vergleich einbezogen werden.

➤ SUMO „Simulation of Urban Mobility“

SUMO ist eine kostenlose Verkehrssimulationssuite, die am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt wurde. Sie ist seit 2001 verfügbar und ermöglicht die Modellierung intermodaler Verkehrssysteme - einschließlich Straßenfahrzeugen, öffentlichen Verkehrsmitteln und Fußgängern. In diesem Simulator können sich die Fahrzeuge frei bewegen, Kollisionen zwischen Fahrzeugen und Unfälle werden simuliert. Jedes Fahrzeug hat seine eigene Route und das Routing der Fahrzeuge ist dynamisch. Dabei wird das Verhalten des Fahrzeugs berücksichtigt, z. B. der Spurwechsel.

SUMO umfasst eine Vielzahl von unterstützenden Tools, die die wichtigsten Aufgaben bei der Erstellung, Durchführung und Auswertung von Verkehrssimulationen automatisieren, z. B. Netzwerkimport, Routenberechnung, Visualisierung und Emissionsberechnung. Die Straßen in SUMO werden als eine Vielzahl von Fahrspuren dargestellt. Die Breite jeder Spur ist ebenso wie die Breite des Fahrzeugs fest vorgegeben. Außerdem werden die verschiedenen Fahrzeugtypen nicht berücksichtigt. Mit SUMO können intermodale Verkehrssysteme mit Straßenfahrzeugen, öffentlichen Verkehrsmitteln und Fußgängern modelliert werden. SUMO kann mit benutzerdefinierten Modellen angereichert werden und bietet verschiedene APIs, mit denen die Simulation aus der Ferne gesteuert werden kann. (25) (26)

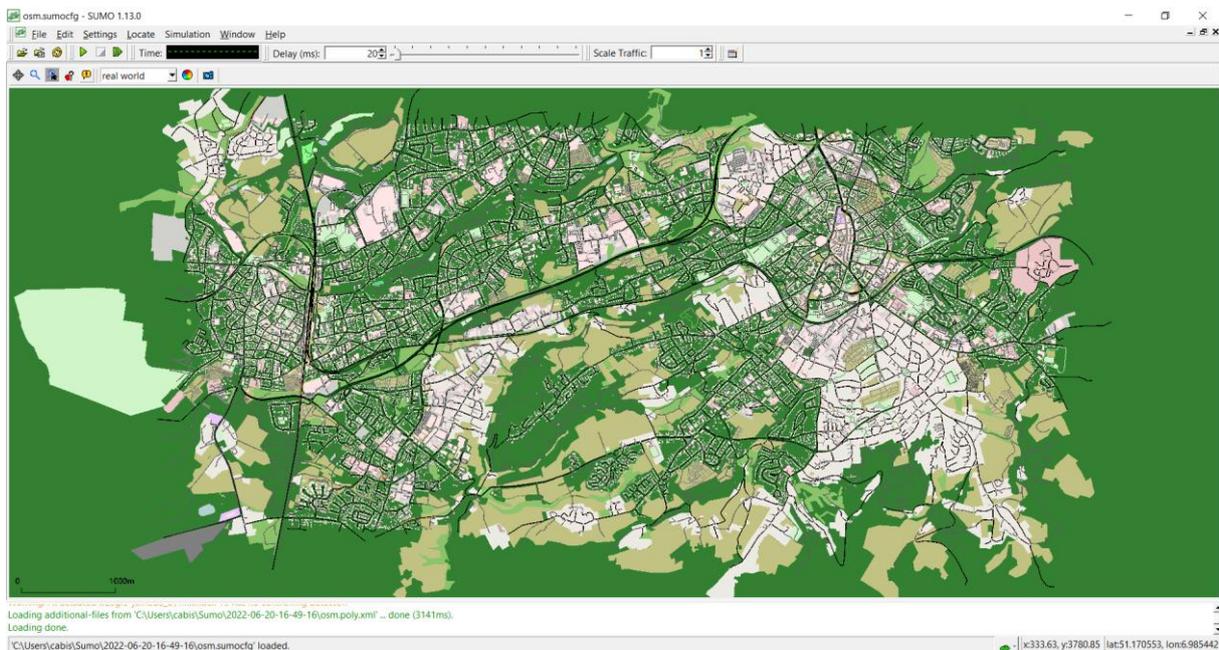


Abbildung 21: Visualisierung des Solinger Simulationsgebietes in SUMO

➤ Aimsun-Next

AIMSUN, Aimsun ist Teil der Yunex Traffic Group, der ehemaligen ITS-Sparte von Siemens Mobility. 1997 in Barcelona, Spanien, gegründet, ist Aimsun Next eine Plattform für die Modellierung mit mehreren Auflösungen, die die Mobilität in Netzwerken jeder Größe simuliert - von einem einzelnen Knotenpunkt bis hin zu einer ganzen Region. Durch die Modellierung von Verkehr, Radfahrern, Fußgängern und öffentlichen Verkehrsmitteln in einem einzigen Paket ist Aimsun Next ein "All-in-One"-Tool für die Planung, Durchführung von Operationen und Bewertung von intelligenten Verkehrssystemen und autonomen Fahrzeugen. Aimsun-Next wird in drei verschiedenen Paketen angeboten: Pro (Micro, Meso, TDM), Advanced und Expert. (27)

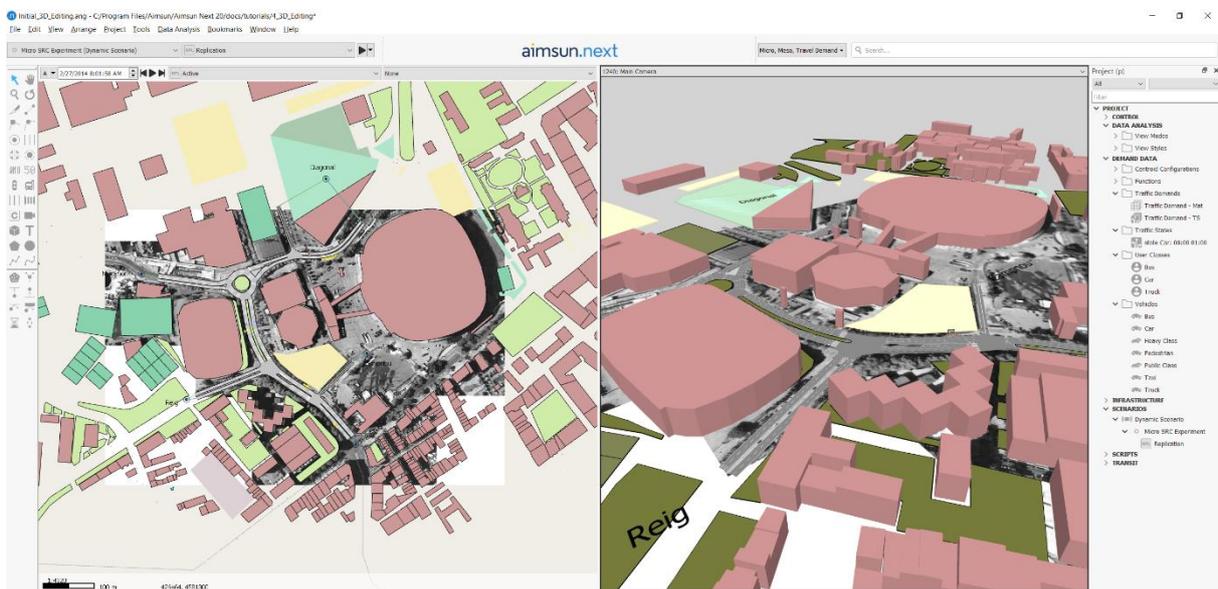


Abbildung 22: Visualisierung eines Beispiels für die graphische Darstellung von Aimsun (28)

➤ MATSim

MATSim (Multi-Agent Transport Simulation) wurde um 2006 von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich mit dem Ziel entwickelt, Verkehrs- und Staumodelle zu generieren. Es bietet eine Reihe von Werkzeugen, um eine sehr große agentenbasierte Simulation zu implementieren. Seitdem hat es sich von einer Sammlung eigenständiger C++-Programme zu einem integrierten, auf Java basierenden Rahmenwerk entwickelt, das öffentlich gehostet wird, als Open Source verfügbar ist und automatisch regressionsgetestet wird. Es wird zur Simulation des Verkehrs in vielen Großstädten wie Zürich in der Schweiz, Berlin in Deutschland oder Toronto in Kanada eingesetzt. MATSim kann den Verkehr einer großen Region über den ganzen Tag hinweg simulieren. Allerdings interessiert es sich nicht für das Verhalten der Fahrzeuge im Einzelnen. MATSim ermöglicht es auch, fahrplanbasierte öffentliche Verkehrsmittel oder selbstfahrende Autos hinzuzufügen. Es ist im Gegensatz zu

anderen Softwarepaketen für die Verkehrssimulation vollständig agentenbasiert und generiert individuelle Aktivitätspläne als Input für die Netzauslastung anstelle von (zeitabhängigen) Ursprungs-Ziel-Matrizen, wie sie üblicherweise bei der dynamischen Verkehrszuweisung verwendet werden. (29) (26)

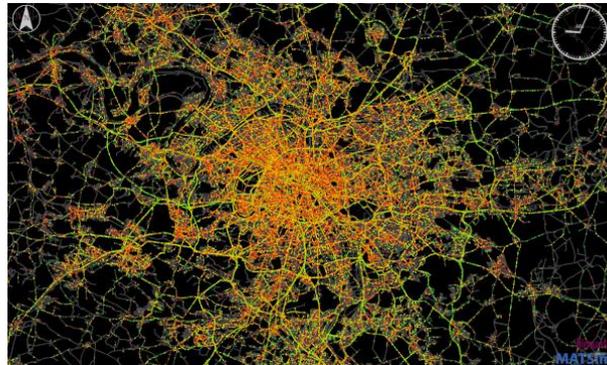


Abbildung 23: Visualisierung der Île-de-France, France in MATSim (30)

➤ CORSIM „CORSIM TRAFVU“

CORSIM, die Abkürzung für corridor simulation, wurde von der Federal Highway Administration entwickelt und wird von ihr gepflegt. Es handelt sich um ein mikroskopisches Simulationsmodell, das dazu dient, Verkehrsanalyseprojekte zu verwalten, Verkehrsnetze zu modellieren, Eingaben für die Analyse der Verkehrssimulation zu erstellen, die Verkehrssimulation auszuführen und die Ergebnisse dieser Modelle zu interpretieren.

CORSIM ist in der Lage, eine Vielzahl von Verkehrsbedingungen zu simulieren. Es wird in einer Softwareumgebung namens Traffic Software Integrated System (TSIS) ausgeführt, die eine integrierte, auf Windows basierende Schnittstelle und Umgebung zur Ausführung des Modells bietet. Ein Schlüsselement des TSIS ist der Ausgabeprozessor TRAFVU, der es dem Analysten ermöglicht, das Netz grafisch darzustellen und seine Leistung mithilfe von Animationen zu bewerten. CORSIM ist ein mikroskopisches Simulationsmodell, das die Position und Bewegung jedes Fahrzeugs im Netzwerk verfolgt. (31)

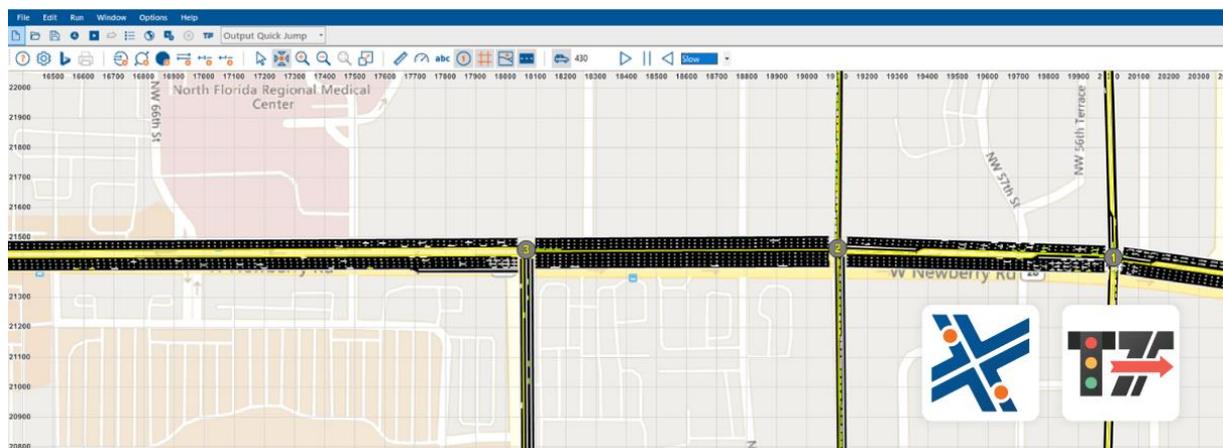


Abbildung 24: Visualisierung eines Beispiels für die graphische Darstellung von CORSIM

➤ SimTraffic

SimTraffic ist eine kostenpflichtige Software. Diese wurde 1999 von der Trafficware Corporation entwickelt und ist ein Simulationswerkzeug für den Straßenverkehr. Es ist Teil eines Softwarepaares, das aus den koordinierten Modellen Synchro und SimTraffic besteht.

SimTraffic ist ein mikroskopisches Simulationsmodell, das die Fähigkeit hat, eine Vielzahl von Verkehrssteuerungen zu simulieren, einschließlich eines Netzwerks mit Ampeln, die über verschiedene Zykluslängen laufen oder unter voll betätigten Bedingungen arbeiten. SimTraffic ist einfach zu bedienen und seine grafische Benutzeroberfläche bietet dem Benutzer eine wesentlich kürzere Zeit für die Codierung des Straßennetzes als andere Modelle. Einer der größten Nachteile von SimTraffic ist das Fehlen von API-Funktionen. (26)



*Abbildung 25: Visualisierung eines Beispiels für die graphische Darstellung von Simtraffic
(32)*

➤ Vissim

Zu den am häufigsten verwendeten Simulationsprogrammen gehört die Software PTV VISSIM. Diese Software wurde als Teil der Vision Traffic Suite entwickelt, zu der auch PTV Visum (Verkehrsanalyse und -prognose) und PTV Vistro (Signal- und Verkehrswirkungsoptimierung) gehören, die von der PTV (Planung Transport Verkehr AG) in Karlsruhe, Deutschland, entwickelt wurde. Die Software kann zur Simulation, Bewertung und Validierung neuer Verkehrspolitiken und Kontrollsysteme verwendet werden. Vissim bietet den Anwendern die Möglichkeit, eine ganze Reihe von Fahrzeugtypen zu definieren, darunter Pkw, Busse, Lkw,

schwere und leichte Schienenfahrzeuge sowie Fußgänger und Radfahrer, und zwar durch die Auswahl von verschiedenen Betriebsmodi.

Was Vissim von anderen Simulationsprogrammen unterscheidet, ist seine Programmierschnittstelle COM (Component Object Model). Sie bietet den Benutzern die Möglichkeit, ihre eigenen Anwendungen für das VISSIM-Netzwerk mithilfe einer Programmiersprache wie C++, Visual Basic oder Python zu entwickeln und zu implementieren. Sie ermöglicht dem Nutzer insbesondere den Zugriff auf die Topologie des Netzwerks, die Signalsteuerung, den Gleisfluss und das Verhalten der Fahrzeuge, was VISSIM dazu veranlasst, eine komplexe Steuerungslogik und ausgeklügelte Transportsysteme und -komponenten zu modellieren.



Abbildung 26: Visualisierung eines Beispiels für die graphische Darstellung von Vissim (33)

4.4.2 Vergleich Kriterien

Der Vergleich der verschiedenen Verkehrssimulationssoftware wird auf der Grundlage der folgenden Kriterien durchgeführt:

- Open Source und freie Nutzung

Open-Source-Software gibt den Nutzern das Recht, die Software kostenlos zu verwenden, eine Eigenschaft, die bei kommerzieller Software nicht sehr verbreitet ist. Open-Source-Projekte werden jedoch immer beliebter, da sie ihren Nutzern das Recht einräumen, das Programm ohne Einschränkungen zu nutzen, zu studieren und zu verändern.

Eine der beliebtesten Eigenschaften von Open-Source-Projekten ist, dass sie von anderen Programmierern verändert werden können, wie bereits oben erwähnt wurde. Diese

Eigenschaft ermöglicht die Parallelisierung von Modellen und Simulationspaketen um High-End-Computersysteme zu erforschen.

➤ **Kompatibilität mit Betriebssystemen**

Die Kompatibilität mit dem Betriebssystem ist ein weiteres Kriterium für Software, das mit der Entwicklung neuer und verbesserter Betriebssysteme immer beliebter wird. Dies ist auch das Hauptproblem, mit dem die meisten Softwarepakete für Verkehrssimulationen konfrontiert werden. Die wenigen Softwarepakete sind in der Lage, unter mehreren Betriebssystemen zu laufen, einschließlich der heute am häufigsten verwendeten: Microsoft Windows, Linux und Mac OS X. Die meisten Softwarepakete, ob kommerziell oder nicht, können nur unter dem Betriebssystem Microsoft Windows laufen.

Die Unfähigkeit, die Software auf den Betriebssystemen Linux und Mac OS X zu nutzen, reduziert und beschränkt ihr Publikum und ihre Nutzerzahl, und das mit jedem Tag, an dem diese beiden Betriebssysteme populärer werden und weltweit genutzt werden, mehr und mehr.

➤ **Simulationsmodelle**

Im Bereich der Simulation des Straßenverkehrs gibt es drei verschiedene Modelle, je nach Detailgrad der Simulation.

- **Mikroskopische Modelle:** Diese Modelle simulieren die Eigenschaften und Interaktionen zwischen einzelnen Fahrzeugen. Sie erzeugen im Wesentlichen die Trajektorien der Fahrzeuge, die sich auf dem Netz bewegen. Dazu gehören auch Beschleunigung, Verzögerung, Spurwechsel und Überholmanöver. Diese mikroskopischen Simulationsmodelle machen eine genaue Analyse der Verkehrsdynamik auf der begrenzten Skala eines Knotenpunkts, einer Anschlussstelle oder eines bestimmten Verkehrskorridors möglich. Die mikroskopischen Modelle ermöglichen eine feine Simulation der Fahrzeugbewegungen entsprechend dem individuellen Verhalten jedes einzelnen Fahrers auf der Straße, ausgehend von seinen Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern und der Beschilderung.

- **Makroskopische Modelle** werden auf das übergeordnete Straßennetz eines großen Gebiets angewandt, z. B. auf der globalen Ebene einer Metropolregion. Diese Modelle simulieren den Verkehrsfluss unter Berücksichtigung der Verkehrsmerkmale (Geschwindigkeit, Verkehrsstärke und Verkehrsdichte) und ihrer Beziehungen zueinander. Diese Modelle werden auf der Grundlage der Erhaltungsgleichungen für Verkehrsströme und Verkehrsstörungen, die sich im Verkehrssystem ausbreiten, erstellt. Daher können sie zur Vorhersage von räumlichen und zeitlichen Überlastungen verwendet werden, die durch die Verkehrsnachfrage oder durch Störungen in einem Straßennetz verursacht werden.

- Mesoskopische Modelle: Diese Modelle sind zwischen dem Ansatz der makroskopischen Modellierung mit regionaler Reichweite und dem Ansatz der mikroskopischen Verkehrssimulation angesiedelt. Sie stellen einen effizienten Kompromiss zwischen beiden dar, indem sie die Lücken des Ersten, hinsichtlich der dynamischen Darstellung des Stauphänomens schließen und gleichzeitig weniger datenintensiv und rechenzeitaufwändig sind als der Zweite. Zu diesem Zweck wird der Verkehr durch kleine Gruppen von Verkehrseinheiten dargestellt, deren Interaktionen auf einer mittleren Detailebene beschrieben werden.

➤ Qualität der grafischen Darstellung

Die Visualisierung der Simulation in Echtzeit ist eine der besten Möglichkeiten, um die Ergebnisse einer Verkehrssimulation zu sehen. Die grafische Darstellung der Verkehrssimulation hilft bei der Untersuchung, was genau in welchen Zeiträumen passiert. Diese Methode kann auch dabei helfen, festzustellen, ob sich während der Verkehrssimulation etwas ändert.

Obwohl alle Verkehrssimulationssoftware eine grafische Darstellung der Simulation enthält, gibt es immer noch große Unterschiede in der Qualität dieser Darstellungen. Die Hauptunterscheidung besteht darin, ob die Grafiken zwei- oder dreidimensional sind.

4.4.3 Ergebnisse

	Open Source und freie Nutzung		Betriebssystem			grafischen Darstellung		Simulationsfähigkeit	
	OS	KO	W	L	M	2D	3D	Mi	Ma
SUMO	X		X	X	X	X		X	X
Aimsun		X	X			X	X	X	X
MATSim	X		X			X			X
Vissim		X	X			X	X	X	
CORSIM		X	X			X	X	X	
SimTraffic		X	X			X	X	X	

Tabelle 1: Vergleichstabelle der Simulationssoftware

OS: Open Source

KO: Kostenpflichtig

W: Microsoft Windows

L: Linux

M: Mac OS

2D: Grafische Darstellung in zwei Dimensionen

- 3D: Graphische Darstellung in drei Dimensionen
- Mi: Mikroskopische Model
- Ma: Makroskopische Model

4.5 OpenStreetMap

OSM ist eine Weltkarte, die von Freiwilligen in Form eines kollaborativen Online-Kartografie-Projekts erstellt wurde. Ziel des Projekts ist es, eine freie Open-Source-Datenbank der Welt zu erstellen. Da die Daten auf dieser Karte frei zugänglich sind, können sie von allen Nutzern unabhängig von ihrem Tätigkeitsbereich verwendet werden. Der Inhalt dieser Karte kann von jedem bearbeitet und editiert werden. (34)

4.5.1 Ursprung von OpenStreetMap

Das Projekt OpenStreetMap erschien im Juli 2004. Zunächst wurde es als eine Kartografie präsentiert, die auf der Grundlage eines GPS-Tracks gezeichnet wurde, der während einer Fahrradtour gesammelt wurde. Es konzentrierte sich speziell auf die Kartografie des Vereinigten Königreichs. Im Jahr 2006 wurde die gemeinnützige Stiftung OpenStreetMap gegründet. Ihr Ziel ist es, das Wachstum, die Entwicklung und die kostenlose Veröffentlichung von Geodaten zu fördern. (35)

4.5.2 Prinzipien von OpenStreetMap

Das Prinzip von OpenStreetMap ist Teil der Strömung der freien Kultur, die der breiten Öffentlichkeit einen freien und kostenlosen Zugang zu Daten garantiert. Es gewährleistet die gemeinsame Nutzung von Geodaten im Gegensatz zu mehreren Organisationen. (36)

4.5.3 Vorteile von OpenStreetMap

Die OpenStreetMap-Lizenz erlaubt einen völlig freien Zugang zu ihren Karten und allen kartografischen Daten, auf denen sie basieren. Laut seinen Schöpfern: "Unser Projekt zielt darauf ab, innovative und interessante Nutzungen dieser Daten zu fördern". Die Beteiligung von Hunderttausenden von Nutzern aus der ganzen Welt an der Einfügung von Daten macht die Karte zur datenreichsten und aktuellsten Karte, die es gibt. (34)

OSM verwendet "Qualitätssicherungs"-Tools, die die Zuverlässigkeit der verbreiteten Informationen garantieren. Diese Werkzeuge, die zur Überprüfung neu eingefügter Daten eingesetzt werden, generieren eine Liste von Fehlern, die die Beitragenden dann korrigieren können. (37)

4.5.4 Nutzen von OpenStreetMap

Dank der kostenlosen Informationen, die von OSM generiert werden, ist es möglich, eine eigene Karte nach den eigenen Bedürfnissen und Erwartungen zu erstellen, im Gegensatz zu

bereits existierenden Karten, die von Anbietern erstellt werden, die ihre eigenen Erwartungen erfüllen. (38)

Darüber hinaus ist festzustellen, dass die Zahl der Nutzer, Bibliotheken und Werkzeuge, die sich auf OSM beziehen, exponentiell ansteigt.

OSM stellt seinen Nutzern Daten zur Verfügung, die sie für verschiedene Zwecke verwenden können, z. B. für die Extraktion von Daten für den Eigengebrauch, die Erstellung interaktiver oder statischer Karten, die Erstellung von Karten für viele GPS-Terminals, die Versorgung bestimmter Geografischer Informationssysteme. (39)

4.6 Kartographische Daten

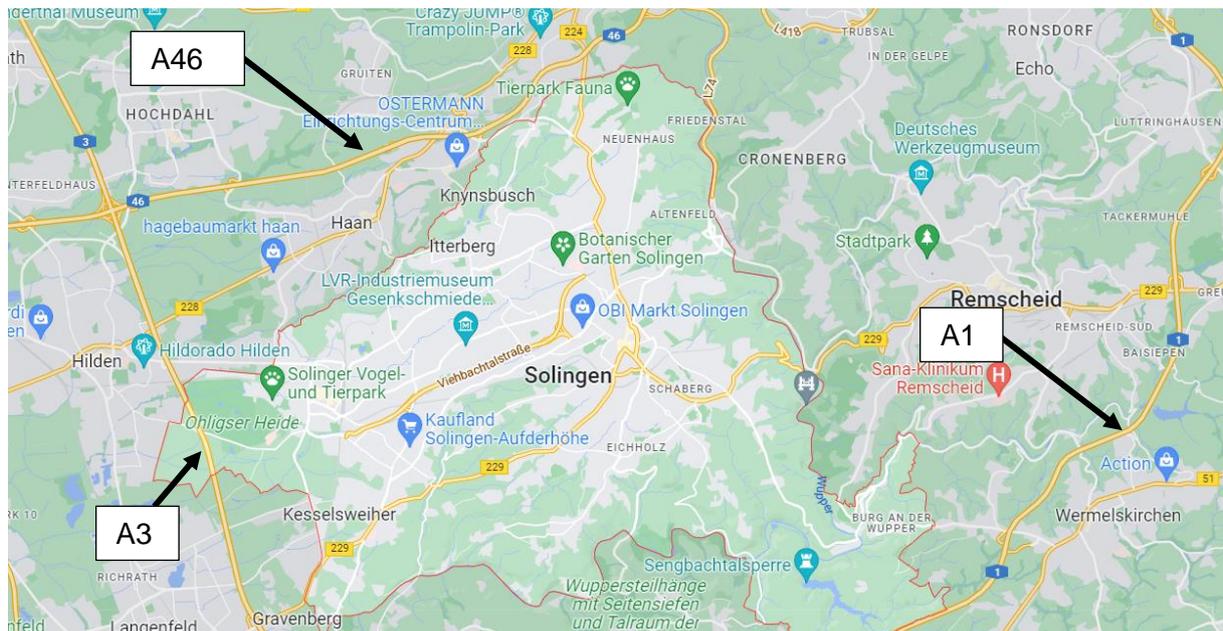


Abbildung 27: Solingens Lage in Bezug auf die Autobahnen

Wie in der Abbildung 27 zu sehen, ist die Stadt Solingen von zwei Autobahnen (A3, A46) umgeben. Trotz dieser Umgebung ist sie nicht optimal an das Autobahnnetz angebunden, da es schwierig ist, die Aus- und Einfahrten der Stadt zu erreichen.

Tatsächlich legen die Fahrzeuge, die aus der Stadt auf die Autobahn fahren oder von der Autobahn in die Stadt kommen, eine große Strecke in der Stadt zurück, was zu Staus an mehreren Kreuzungen führt, wie z. B. der Kreuzung Bonner Straße und Langhansstraße.



Abbildung 28: Kreuzung Bonner Str./Langhans Str. mit OpenStreetMap

Der Knotenpunkt, der in der obigen Abbildung angezeigt wird, besteht aus den drei Hauptachsen Bonner Straße, Langhansstraße und L288:

Die Bonner Straße ist eine Nord-Süd-Straße, die Ohligs (ein Stadtteil von Solingen) über die Landstraße 229 mit Langenfeld verbindet. Sie stellt auch einen Übergang für Fahrzeuge dar, die auf die Autobahn A3 wollen. Diese verbindet Solingen mit den beiden benachbarten Großstädten Düsseldorf und Köln.

Die Langhansstraße verbindet die Stadt Solingen mit dem Süden von Hilden.

Die L288 ist eine Hauptverkehrsader für die Stadt Solingen, die von Ost nach West verläuft.

Der Knotenpunkt befindet sich in der Nähe eines Industriegebiets, was bedeutet, dass viele LKWs auf der Straße sind und den Verkehr blockieren. Außerdem befindet sich der Knotenpunkt in der Nähe der St. Lukas Klinik, was eine freie Fahrbahn erfordert, um die Durchfahrt von Krankenwagen zu ermöglichen. Diese beiden Faktoren erschweren den Verkehr und führen zu Staus am Knotenpunkt.

4.7 Informationen über dem Verkehr

Neben Karteninformationen muss eine Simulation auch in der Lage sein, realistische Fahrzeugströme zu berücksichtigen. Die Verwendung von Daten aus dem realen Verkehr ist natürlich viel relevanter, um die von der Simulation gelieferten Ergebnisse zu validieren. Die Verfügbarkeit dieser Daten nimmt stetig zu. Bei diesen Daten handelt es sich um Verkehrsindikatoren für eine Reihe wichtiger Punkte im Straßennetz: Verkehrsfluss (Anzahl der Fahrzeuge pro Messperiode), Belegungsgrad des Straßenabschnitts oder Verkehrsstärke (Verhältnis zwischen der Länge aller Fahrzeuge auf einem Abschnitt und der Länge dieses Abschnitts) und Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge. Diese Informationen

ermöglichen z. B. die Rekonstruktion einer simulierten Fahrzeugpopulation, die ähnliche Merkmale aufweist. Ebenso verfügen die meisten Großstädte der Welt über statische Messsysteme.

Methode zur Berechnung des Verkehrsflusses:

Die Anzahl der Fahrzeuge wird in einem kleinen Zeitabschnitt (weniger als eine Stunde) gemessen. Die Messdauer kann 5, 10 oder 15 Minuten betragen und wird je nach gewählter Messdauer als V_5 , V_{10} oder V_{15} bezeichnet. Der Verkehrsfluss wird folgendermaßen berechnet:

$$Q = 12 * V_5$$

$$Q = 6 * V_{10}$$

$$Q = 4 * V_{15}$$

Sammeln von Daten:

Die Datensammlung ist eine sehr wichtige Phase des Projekts. Denn in dieser Phase geht es darum, Informationen zu sammeln, die später analysiert werden, um die Problematik des Projekts zu behandeln.

In diesem Zusammenhang werden wir für dieses Projekt die notwendigen Daten selbst sammeln, da es sehr schwierig ist, diese von der Stadt zu erhalten.

Um dies zu tun, war es notwendig, sich an dem Knotenpunkt der Langhansstraße und der Bonner Straße aufzuhalten, wie in der folgenden Abbildung dargestellt, und zwar während drei verschiedener Zeitintervalle an zwei Tagen, zuerst am Sonntag, den 08.05.2022 von 9.00 bis 10.00 Uhr, dann am Montag, den 09.05.2022 morgens von 7.00 bis 8.00 Uhr und schließlich am selben Tag von 16.00 bis 17.00 Uhr, um die Verkehrsdichte in zwei verschiedenen Situationen erfassen zu können.

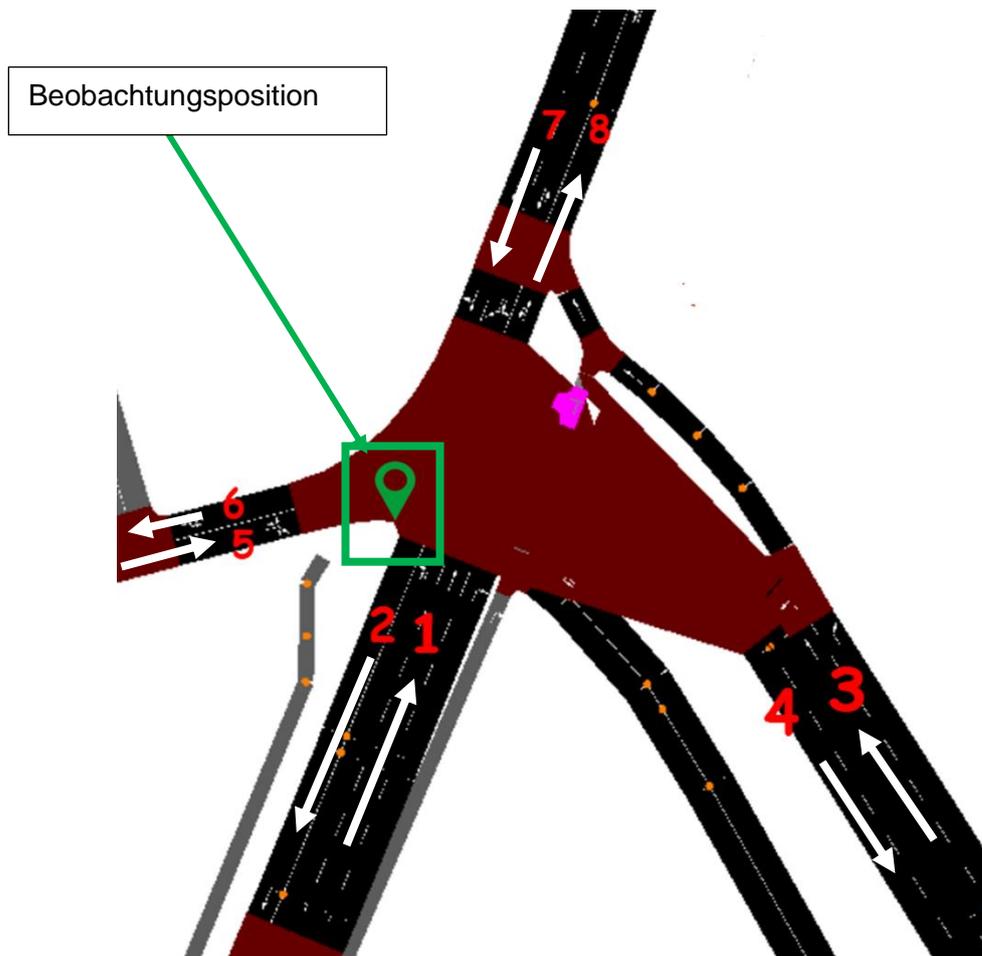


Abbildung 29: Die Kreuzung zwischen Bonner Straße und Langhansstraße mit SUMO

Mit Hilfe eines Telefons wurde 15 Minuten lang die Anzahl der Autos gezählt, die im Knotenpunkt Langhansstraße/Bonner Straße in alle Richtungen fahren, und dann mit der im vorherigen Abschnitt erläuterten Methode den Verkehrsfluss berechnet.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Sonntag 09-10	54	132	120	84	48	72	192	126
Montag 07-08	804	984	384	552	240	192	1008	708
Montag 16-17	936	598	252	696	336	380	768	618

Tabelle 2 Die Anzahl der Fahrzeuge, die die Kreuzung überquert haben.

Diese Aktion stellte sich später als sehr schwierig, nicht effizient und von einer Einzelperson nicht durchführbar heraus. Nach Gesprächen mit Herrn Antoine Tordeux (meinem Betreuer bei diesem Projekt) und angesichts der Tatsache, dass das Ziel des Projekts nicht die Erhebung von realen Daten ist, sondern die Verbesserung des Verkehrsflusses in dem Knotenpunkt, entschieden wir uns schließlich, die Simulation mit zwei ausgewählten Werten durchzuführen. Zuerst wird der Straßenverkehr mit einer kleinen Anzahl von Autos simuliert, dann mit einer großen Anzahl von Autos, die den Knotenpunkt passieren.

5 Simulation und Auswertung

Im vorherigen Kapitel wurde das Openstreetmap-Projekt vorgestellt, indem die Entstehung, die Prinzipien und der Zweck des Projekts erläutert wurden. Anschließend wurde eine Kampagne zur Sammlung von realen Daten vor Ort durchgeführt. Im Rahmen einer Feldstudie wurde der Verkehrsfluss an der Kreuzung der Bonner Straße, der Langhansstraße und der L288 gemessen.

Diese Werte werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendet, um eine Simulation zu erstellen, die dem täglichen Verkehr an dem zu untersuchenden Knotenpunkt nahekommt.

In diesem fünften Kapitel wird eine Simulation des Straßenverkehrs im Knotenpunkt der Bonner Straße, der Langhansstraße und der L288 durchgeführt und die Einstellungen der Lichtsignalanlage verändert, um herauszufinden, ob es möglich ist, eine bessere Formel für die Ampelschaltung zu finden, die den Verkehrsfluss verbessert und die Wartezeiten für die Autofahrer verkürzt.

5.1 Vorbereitung des Szenarios

Um das Szenario vorzubereiten, sollte zunächst die OSMWebWizard-Anwendung heruntergeladen werden, ein Tool, das Teil der SUMO-Umgebung ist. Um die Karte, auf der das Simulationsszenario stattfinden soll, mit wenigen Schritten vorzubereiten, genügt es die OSMWebWizard-Anwendung zu öffnen und eine webbasierte grafische Benutzeroberfläche auf dem Internetbrowser zu starten. Diese Anwendung ist sehr einfach zu bedienen und verfügt über eine sehr intuitive Benutzeroberfläche, die es auch weniger erfahrenen Nutzern ermöglicht, die Anwendung innerhalb weniger Minuten, wie ein Profi zu bedienen.

Der Benutzer kann ganz einfach aus einer auf OpenStreetMap basierenden Kartendarstellung das Gebiet auswählen, in dem das Szenario gespielt werden soll. Der OSMWebWizard erledigt dann alles Weitere automatisch. Die Kartenparameter und die Verkehrsnetzdaten werden aus OpenStreetMap importiert. Alle diese Informationen werden dann in SUMO exportiert und ein Bestand an Straßen mit Fahrzeugverkehr wird generiert. Auch Fahrten durch das Netzwerk für öffentliche Verkehrsmittel für einzelne Personen werden durch dynamische Routenplanung und -zuweisung generiert.

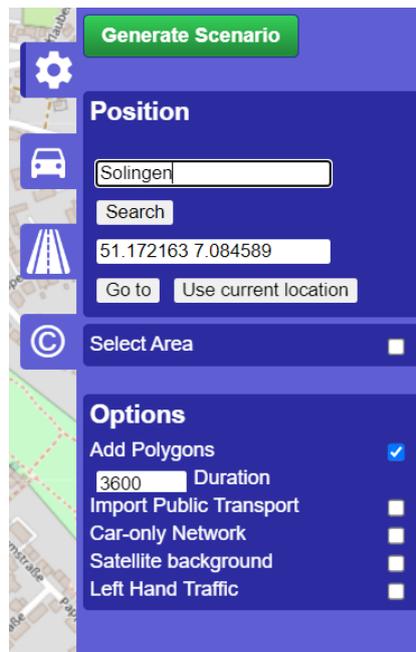


Abbildung 30: Visualisierung der Benutzeroberfläche von OSM Web Wizard

5.2 Vergleich des importierten Verkehrsflusses mit den erhobenen Werten

OpenStreetMap liefert sehr zuverlässige Kartendaten in Form von Dateien in einem weit verbreiteten Format. Dies ermöglicht die Verwendung der Dateien für die Integration von Karten in die SUMO-Software.

Allerdings fällt beim Start der Simulation auf, dass die Anzahl der simulierten Autos sehr weit von der Realität entfernt ist. Der Unterschied zwischen der Anzahl der mit SUMO simulierten Autos anhand von Karten und den von OpenStreetMap gelieferten Informationen ist tatsächlich sehr groß.

Die Simulation erzeugte 63 Fahrzeuge während einer Stunde Simulation, während die Datenerhebung vor Ort die Anzahl von 414 Fahrzeugen am Sonntag, den 08.05.2022 zwischen 09:00 und 10:00 Uhr und die Anzahl von 2436 Fahrzeugen am Montag, den 09.05.2022 zwischen 07:00 und 08:00 Uhr ergab.

Das bedeutet, dass die Informationen am Sonntag um 85% und am Montagmorgen um fast 98% von der Realität abweichen.

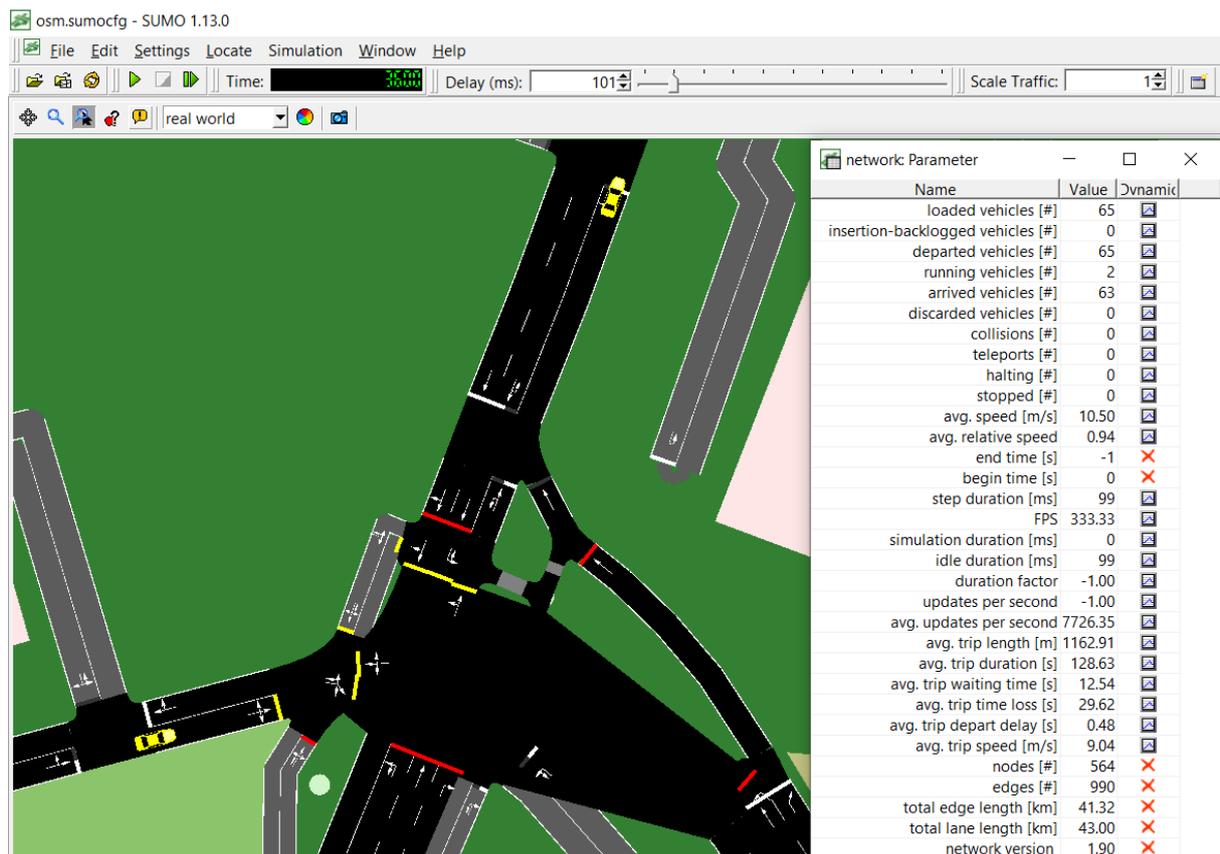


Abbildung 31: Visualisierung der Simulation mit den von SUMO gelieferten Parametern

5.3 Beschreibung der Szenarien

Die Szenarien werden in drei weiteren Kapiteln beschrieben. In diesen drei Kapiteln sollen viele Kombinationen dargestellt werden, im Ersten werden die in der realen Situation am Montagmorgen beobachteten Werte nachgebildet, im Zweiten wird eine große Anzahl von Fahrzeugen in der Verkehrsnachfrage durchgespielt und schließlich werden die am Sonntag eingegebenen Werte in einem dritten Szenario simuliert.

Einerseits soll eine Simulation zeigen, wie die Situation an der Kreuzung aussieht, wenn die Ampelsteuerung genauso eingestellt wird, wie von OSM bereitgestellt, und die vor Ort erhobene Anzahl zusammengestellt wird. Dann wird die Steuerung geändert und die Anzahl der am Zielpunkt ankommenden Fahrzeuge berechnet und verglichen, um die beste Kombination für eine simulierte Verkehrsnachfrage zu ermitteln.

Eine weitere Simulation soll zeigen, wie der Verkehrsfluss aussieht, wenn eine Verkehrsnachfrage von 10.000 Fahrzeugen in jeder Spur simuliert wird, um eine Extremsituation an der Kreuzung zu schaffen, dann wird wie im ersten Szenario die Ampelsteuerung geändert und die Anzahl der am Zielort ankommenden Fahrzeuge erfasst, und dies wird mehrere Male wiederholt, wobei jedes Mal eine andere Einstellung der

Ampelschaltung gewählt wird. Schließlich werden die Zahlen verglichen und eine optimale Ampelsteuerung für diese Extremsituation ermittelt.

Die dritte Simulation hat den gleichen Ansatz wie die erste, aber es wird eine andere Anzahl von Fahrzeugen für eine andere Extremsituation, nämlich eine sehr geringe Verkehrsnachfrage, durchgespielt. Das bedeutet, dass der Knotenpunkt in jeder denkbaren Situation simuliert und die optimale Ampelsteuerung für jede Situation bestimmt wird.

5.4 Auswahl von Straßen

Straßen werden in SUMO als eine Folge von Kanten definiert, die in Wirklichkeit Straßenabschnitte sind. Knotenpunkte im Sumo-Netzwerk enthalten neue Attribute, die in den folgenden Abschnitten berücksichtigt werden müssen. SUMO-Netze enthalten detaillierte Informationen über die möglichen Bewegungen an Knotenpunkten und die entsprechenden Prioritätsregeln, die zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens der Simulation verwendet werden.

Zur Auslegung der Routen für die Szenario-Simulation empfiehlt es sich, Netedit zu verwenden. Dieses Tool ist ein grafischer Netzwerk-Editor, der zum Erstellen, Analysieren und Bearbeiten von Netzwerkdateien verwendet werden kann.



Abbildung 32: Demand Menü

Für jede Route ist es zwingend notwendig, für jeden Weg einen Startpunkt und einen Zielpunkt zu definieren und alle Abschnitte auszuwählen, durch die der Fahrweg führt.

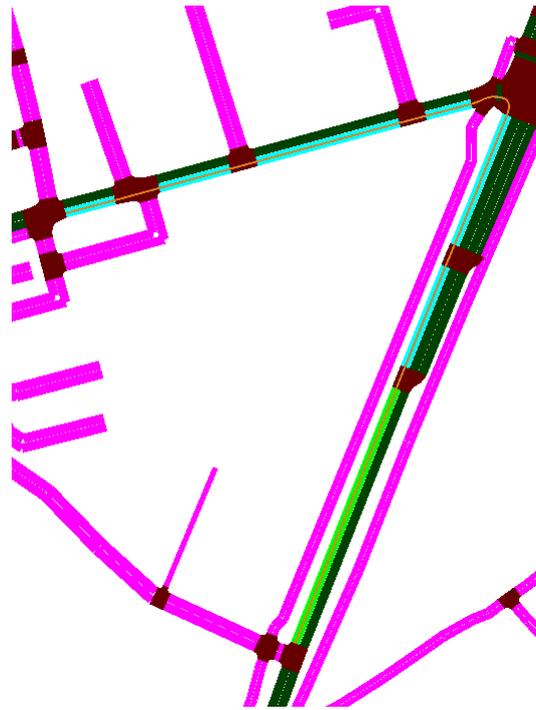


Abbildung 33: Visualisierung der Festlegung einer Fahrspur

5.5 Auslegung von Verkehrsflüssen

In Sumo können Verkehrsströme, wie Straßen mit Hilfe des NETEDIT-Tools definiert werden, indem das Menü "Demand" und dann das Auto-Icon ausgewählt wird. Anschließend wird der Fahrweg oder die Route eines PKWs definiert, um den Verkehrsfluss auf diesem Straßenabschnitt zum Knotenpunkt nachahmen zu können. Wie im Kapitel Definition von Straßen erläutert, werden die Verkehrsflüsse, wenn es Knotenpunkte gibt, addiert und dann entsprechend den Informationen aus dem Sumo-Netze den Prioritätsregeln des Knotenpunkts und dem dynamischen Verhalten der Simulation aufgeteilt.

Flow attributes	
terminate	end-number
end	3600.00
number	1800

Abbildung 34: Definition von Attributen

am frühen Morgen zwischen 7:00 - 8:00 Uhr ermittelt. Jeder Fahrspur wird die tatsächliche Anzahl der Fahrzeuge zugeordnet.

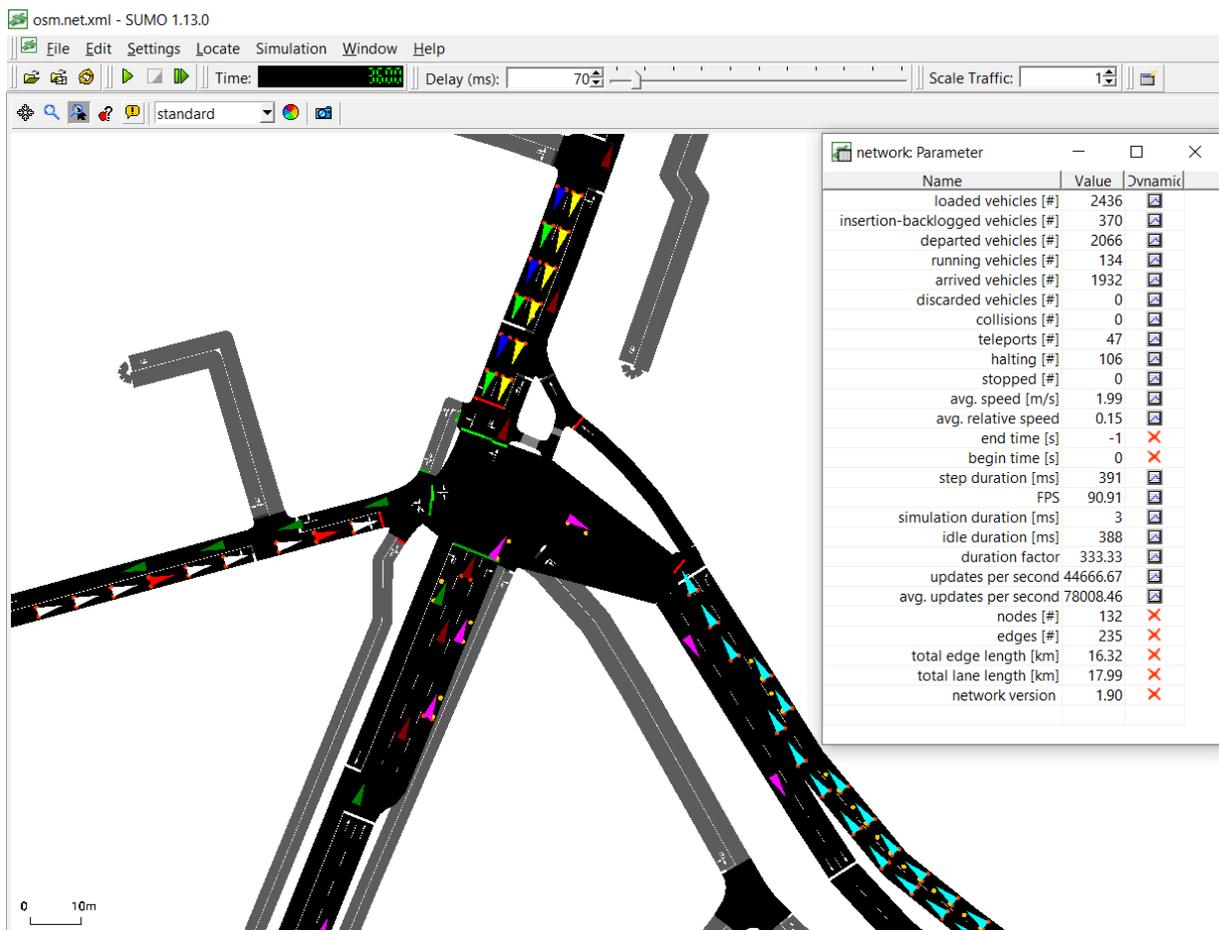


Abbildung 37: Simulation des ersten Szenarios

Es werden 10 Versuche durchgeführt in dem die jeweiligen Grünphasen variiert werden, zwischen 5 - 50 Sekunden.

Versuche	Einstellung	
	Bonner Str	Langhansstr.+L288
1	50s	5s
2	45s	10s
3	40s	15s
4	35s	20s
5	30s	25s
6	25s	30s
7	20s	35s
8	15s	40s
9	10s	45s
10	5s	50s

Tabelle 3 Einstellungen der Lichtsignalanlage

5.8 Ergebnisse des ersten Szenarios

Im Rahmen der Simulationsanalyse des ersten Szenarios werden die Ergebnisse, die sich in der Tabelle im Anhang befinden, in einem Diagramm dargestellt.

Wie in Diagramm 38 zu sehen ist, werden die Verkehrsflussdichten am Ausgang der Simulation für jede Einstellung angezeigt.

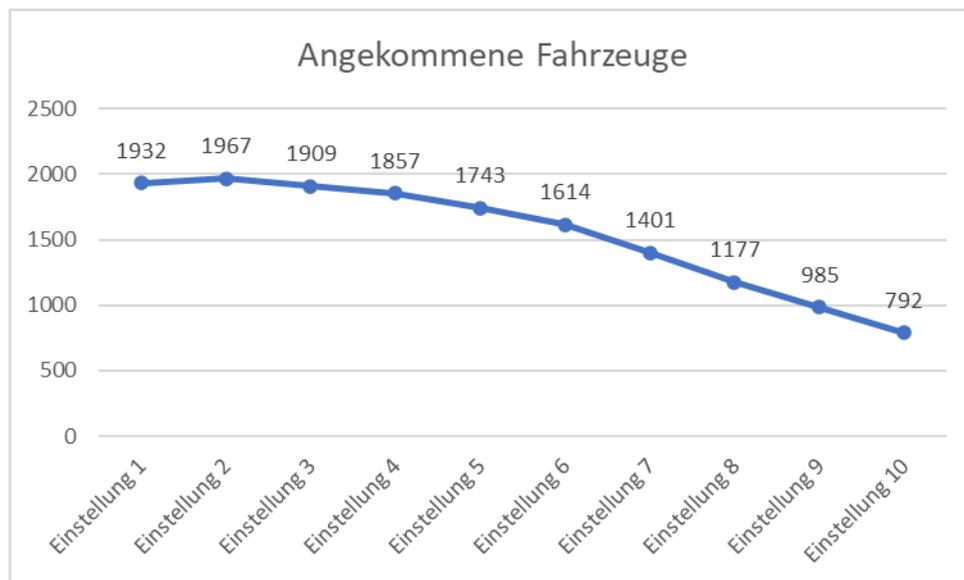


Abbildung 38 Ergebnisse des ersten Szenarios

Das beste Ergebnis der Simulation wurde im zweiten Versuch mit 1967 Fahrzeugen erzielt. Dieses Ergebnis wurde mit folgenden Einstellungen der Ampelphasen erreicht: 45 Sekunden Grünzeit auf der Bonner Straße und 10 Sekunden auf der Langhansstraße und der L288 mit 3 Sekunden, in denen alle Ampeln auf Rot standen.

5.9 Implementierung des zweiten Szenarios

Nachdem das erste Szenario mit SUMO ausgeführt wurde, wurden im zweiten Szenario neue Parameter für die Verkehrsnachfrage festgelegt. In diesem Fall wurde jede Fahrspur mit 10.000 Fahrzeugen belegt, um eine ungewöhnlich starke Verkehrssituation zu schaffen.

Anschließend werden wie im ersten Szenario zehn Versuche mit zehn verschiedenen LSA-Einstellungen durchgeführt, um die beste LSA-Einstellung zu ermitteln, die für eine sehr hohe Verkehrsnachfrage geeignet ist.

Die LSA-Einstellungen werden, wie in Diagramm 36 zu sehen, wie folgt vorgenommen

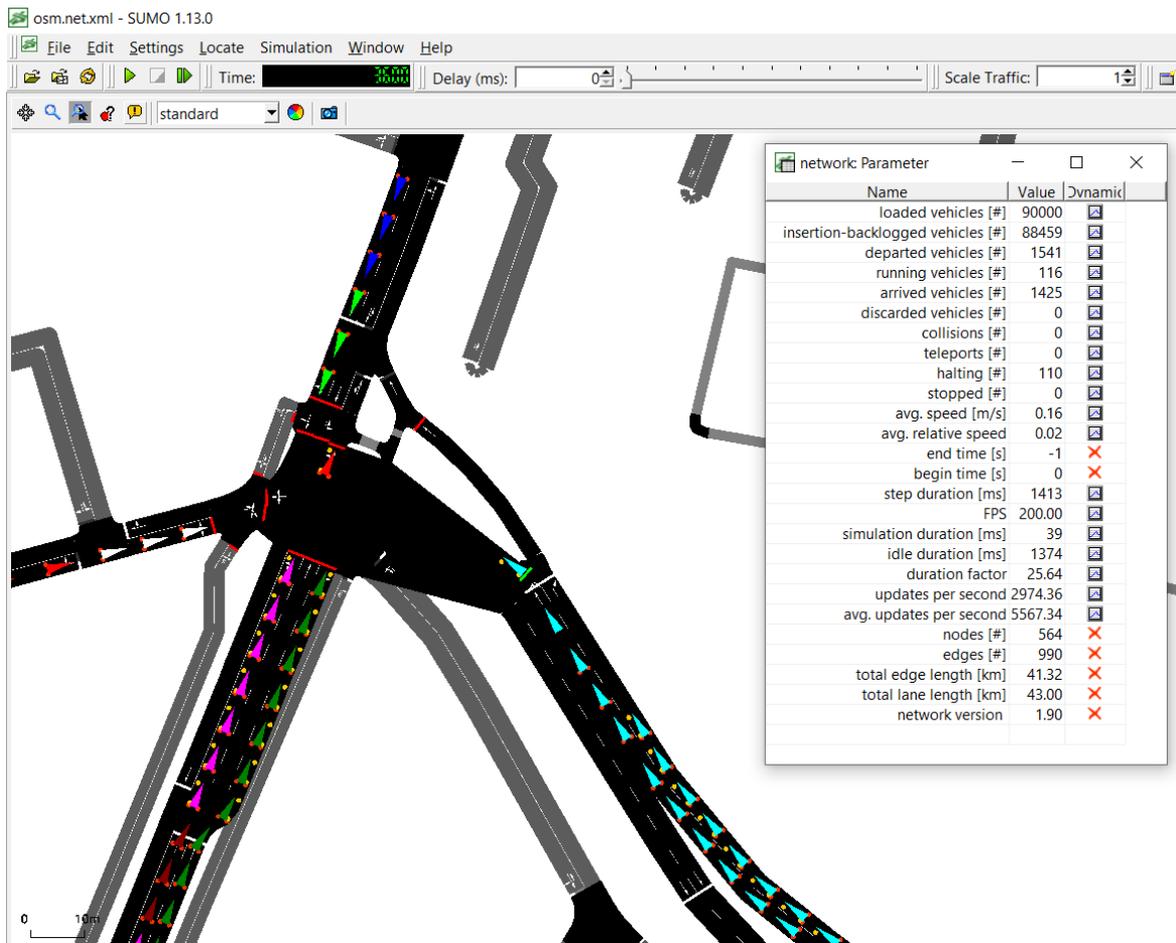


Abbildung 39: Simulation des zweiten Szenarios

5.10 Ergebnisse des zweiten Szenarios

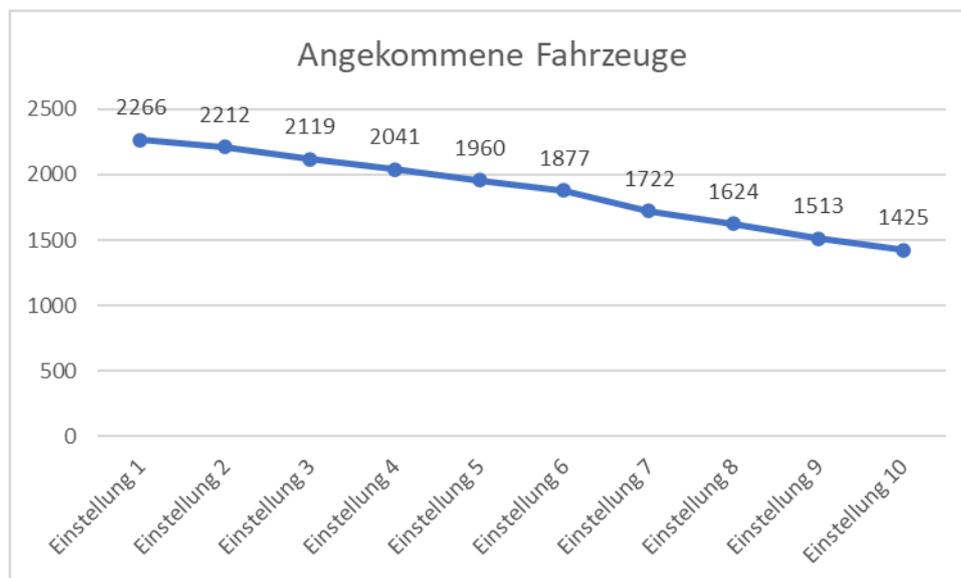


Abbildung 40 Ergebnisse des zweiten Szenarios

Wie in Abbildung 40 zu sehen ist, war die Situation, in der die meisten Fahrzeuge den Zielpunkt erreichten, die Situation, in der die Bonner Straße im Vergleich zur Langhansstraße und der L288 die längste Grünphase hatte, d. h. 50 Sekunden Grünphase für die Bonner Straße und 5 Sekunden für die Langhansstraße und die L288.

5.11 Implementierung des dritten Szenarios

Im dritten Szenario wird die Verkehrsnachfrage anhand der Werte eingestellt, die am Sonntag, dem 08.05.2022, von 9.00 bis 10.00 Uhr erhoben wurden.

Nachdem die Verkehrsnachfrage eingestellt wurde. Wie in den beiden vorangegangenen Szenarien werden zehn Versuche mit zehn verschiedenen Einstellungen der Ampelphasen durchführt. So finden wird die besten Einstellungen für alle Verkehrssituationen, die der Situation am Sonntag ähneln, ermittelt.

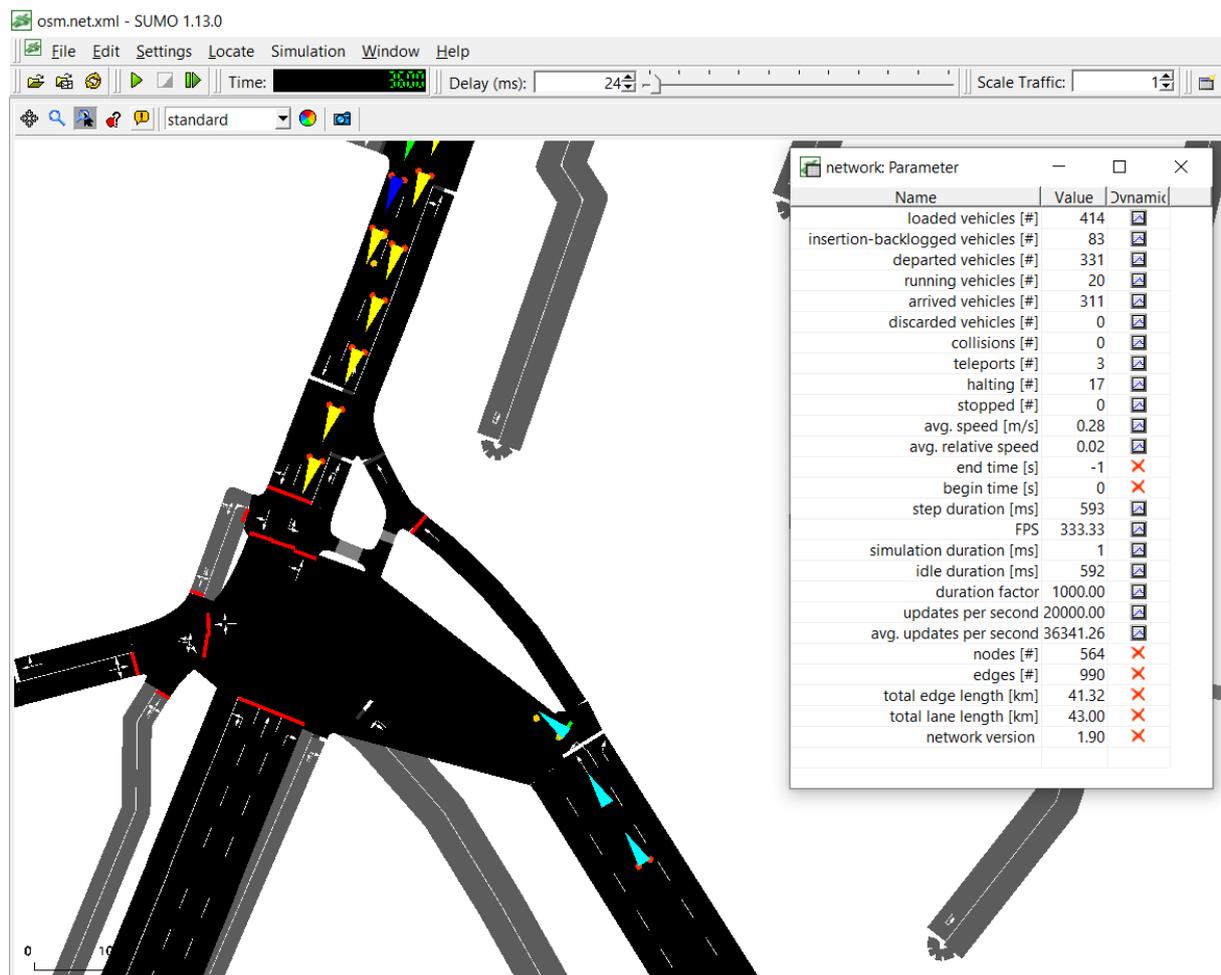


Abbildung 41 Simulation des dritten Szenarios

5.12 Ergebnisse des dritten Szenarios

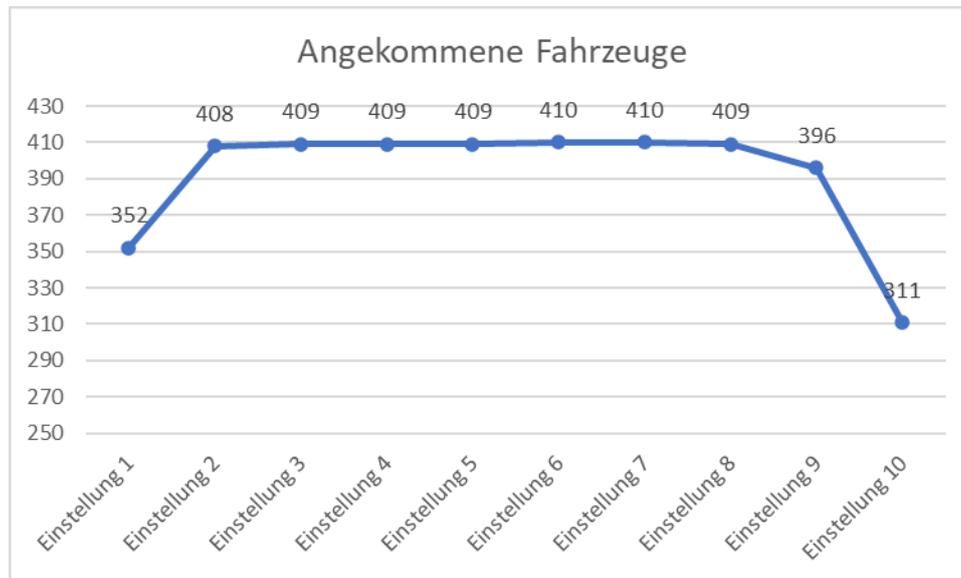


Abbildung 42 Ergebnisse des dritten Szenarios

Wie die Abbildung 42 zeigt, liefern außer den Einstellungen 1, 9 und 10 auch alle anderen Einstellungen ein fast identisches Ergebnis.

6 Fazit & Ausblick

Heutzutage werden Fahrzeuge im Straßenverkehr zunehmend mit intelligenten, vernetzten und sogar automatisierten Systemen ausgestattet. Trotz dieser Tatsache steigt die Zahl der Vorfälle und Hindernisse im Straßenverkehr weiter an. Dieser Effekt stellt die Effizienz des bestehenden Straßensystems in Frage und macht eine Umgestaltung des Straßenverkehrsmanagements erforderlich. In diesem Zusammenhang führt dieses Abschlussprojekt eine gründliche Analyse und Simulation mithilfe der Straßenverkehrssimulationssoftware SUMO an der Kreuzung zwischen der Langhansstraße, der Bonner Straße und der L288 in Solingen durch.

Nach der Simulation der drei Szenarien zeigen die Ergebnisse das Potenzial und die Vorteile der untersuchten Modelle in ihren verschiedenen Zuständen und Daten; Straßenverkehr mit geringer Anzahl von Autos an einem Sonntag, Verkehr mit einer üblichen Anzahl von Autos an einem Montag und eine sehr große Anzahl von Autos bei einem Vorfall in den Randstraßen. Es ist wichtig zu beachten, dass der Konflikt auf der Kreuzung, die Kurven und die Hauptströme einen großen Einfluss auf die Überlastung von Fahrzeugen an Kreuzungen haben, da viele Faktoren die Gesamtheit der eingegebenen Daten repräsentieren, z. B. Verkehrsaufkommen, Fahrzeit, Geschwindigkeit etc.

Um ein reales und optimales Ergebnis zu erzielen, empfiehlt es sich, das Straßennetz unter Einbeziehung aller Parameter zu modellieren. Denn das Straßennetz vereint nicht nur Fahrzeuge, sondern auch Lastwagen, Fußgänger und Busse.

Diese Parameter können entweder manuell in der SUMO-Software (demand) oder automatisch mithilfe der OpenStreetMap-Plattform hinzugefügt werden.

Das Interessante an der Verwendung der SUMO-Software war, dass wir mit mehreren Einschränkungen konfrontiert waren, denen der Straßenverkehr ausgesetzt sein kann. Infolgedessen musste man sich neues Wissen über fiktive und reale Verkehrssituationen aneignen, mehr über neue Verfahren lernen und bestimmte Prinzipien untersuchen.

Die Simulation mit Hilfe der Software SUMO hilft, den Verkehrsfluss nach verschiedenen Anforderungen zu bestimmen. Derzeit kann man die Route mit der Anzahl der Verkehrsteilnehmer darstellen. Durch die Verbesserung der für die Simulation verwendeten Software wird es möglich sein, die Dauer von Staus zu bestimmen und diese automatisch anzuwenden.

Die ständige Weiterentwicklung der Plattformen und der Einsatz von Technologie wird die Kommunikationswerkzeuge zwischen allen Verkehrsteilnehmern immer mehr bereichern, und warum nicht, es wird der Tag kommen, an dem das Straßensystem automatisiert wird und der Fahrer die kleinsten Befehle ausführt.

7 Literaturverzeichnis

1. bergischsmartmobility.de. [Online]
2. *Politik sieht Pläne zum Kreisverkehr kritisch*, Ohligs. Dowe, Kristin. 2019, Solinger Tageblatt.
3. *Ohligs: Nur ein Kreisverkehr mit Bypässen hätte Aussicht auf Erfolg*. Dowe, Kristin. 2020, Solinger Tageblatt.
4. GAZIS, DENOS C. *THE ORIGINS OF TRAFFIC THEORY*. 2002.
5. J.G.Wardrop. *Some theoretical aspects of road traffic*. s.l. : the Institution of Civil Engineers, 1952.
6. R.E. Chandler, R. Herman, and E.W. Montroll. *Traffic dynamics: studies in car following*. 1958.
7. Nathan Gartner, Hani Mahmassani, Carroll J. Messer, . *Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art Report*. 1997.
8. S. Maerivoet, B. De Moor. *Traffic Flow Theory*. Katholieke Universiteit Leuven : Department of Electrical Engineering ESAT-SCD, 2008.
9. Serge Paul Hoogendoorn, Victor Knoop. Chapter 02: Microscopic and macroscopic traffic flow variables. *Traffic Flow Theory and Simulation*. 2016.
10. Daganzo, Carlos F. *Fundamentals of Transportation and Traffic Operations*. s.l. : Elsevier Science Ltd, 1997.
11. Whitham, M.J. Lighthill and G.B. *A theory of traffic flow on long crowded roads*. 1955.
12. *Traffic density estimation with the cell transmission model*. Laura Muñoz, Xiaotian Sun, Roberto Horowitz, Luis Alvarez. Colorado : s.n., 2003. the American Control Conference. S. 3750–3755.
13. *Discussion on traffic stream measurements and definitions*. Edie, L.C. Paris, France : s.n., 1965. the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic flow. S. 139–154.
14. Kesting, Martin Treiber · Arne. *Verkehrsdynamik und -simulation*. s.l. : Springer, 2010.
15. Wu, Ning. *Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm*.
16. *Entwurf und Bau von Straßen*. KIT Karlsruher Institut für Technologie : Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen .
17. *The Application of Axiomatic Design Theory and Conflict Techniques for the Design of Intersections: Part 1*. Mary Kathryn Thompson, Oh Hoon Kwon, Min Ju Park. 2009. 5th International Conference on Axiomatic Design.
18. [Online] 17. 1 2016.
<https://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=http%3A%2F%2Fwww.victoriacountyhistory.ac.uk%2Fexplore%2Fitems%2Fwestminster-road-semaphore#federation=archive.wikiwix.com>.
19. [Online] https://cce.oregonstate.edu/sites/cce.oregonstate.edu/files/pw_sigtime.pdf.

20. Lackes, Prof. Dr. Richard. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/>.
<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/>. [Online] 19. 2 2018.
<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/simulation-43833/version-267158>.
21. Moltenbrey, Michael. *Einführung in die Verkehrssimulation*. München : © Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH,, 2020.
22. Sauerbier, Thomas. *Theorie und Praxis von Simulationssystemen*. Wiesbaden : Vieweg, 1999.
23. Wiedemann, Rainer. *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. 1974.
24. *Simuler le trafic routier à partir de données réelles*. Philippe Mathieu, Sébastien Picault. 2016, Revue D Intelligence Artificielle.
25. *Microscopic Traffic Simulation using SUMO*. Yun-Pang, Pablo Alvarez Lopez and Michael Behrisch and Laura Bieker-Walz and Jakob Erdmann and. Maui, USA : IEEE, 2018. The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems.
26. Mustapha Saidallah, Abdeslam El Fergougui and Abdelbaki Elbelrhiti Elalaoui. *A Comparative Study of Urban Road Traffic Simulators*. Meknes, Morocco : s.n., 2016.
27. Aimsun SLU, Aimsun. *Aimsun Next Editions Optional components Programming tools*. s.l. : Aimsun SLU, Aimsun, 2021.
28. [Online]
https://docs.aimsun.com/next/22.0.1/Tutorials/4_3D_Editing/images/updated_image4.png.
29. W. Axhausen Kay, Horni Andreas, Nagel Kai. *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. s.l. : Ubiquity Press, 2016.
30. [Online] <https://github.com/eqasim-org/ile-de-france/blob/develop/docs/via.png?raw=true>.
31. *Traffic Simulation Software: Traffic Flow Characteristics in CORSIM*. Seongho Kim, Wonho Suh, Jungin Kim. 2014. 2014 International Conference on Information Science and Applications (ICISA).
32. [Online] http://trnsplan.weebly.com/uploads/3/2/0/2/3202417/7119459_orig.jpg.
33. Suttipong-Thajchayapong. www.researchgate.net. www.researchgate.net. [Online] Juni 2015. <https://www.researchgate.net/profile/Suttipong-Thajchayapong/publication/292869518/figure/fig1/AS:370594811006976@1465368096286/Sample-Screenshot-VISSIM-VI-CONCLUSION-AND-FUTURE-WORKS.png>.
34. Beliën, Jonathan. [Online] 06. 07 2022.
<https://jbelien.be/openstreetmap/2018/07/14/switch-to-osm.html?fbclid=IwAR2sfF5TuiuK3NxvecXoHW49RlcqoSFGuLqX5LwAARI15c0ujFSK3cQP>
 EpM.
35. [Online] 06. 07 2022.
https://wiki.openstreetmap.org/wiki/FR:Histoire_de_OpenStreetMap.

36. [Online] 06. 07 2022.
https://wiki.openstreetmap.org/wiki/FR:%C3%80_propos_d%E2%80%99OpenStreetMap.
37. [Online] 06. 07 2022. https://wiki.openstreetmap.org/wiki/FR:Assurance_qualit%C3%A9.
38. [Online] 06. 07 2022. <https://www.openstreetmap.org/user/jbelien/diary/44358>.
39. [Online] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/OpenStreetMap.html?fbclid=IwAR0GD31ieiVFeVpdoST2aiaxZYHRxyBBSBPPgsofHp5R8AWkfuQmbPV9Cow>.
40. Whitham, M.J. Lighthill and G.B. *On kinematic waves: II. A theory of traffic flow on long crowded roads*. s.l. : the Royal Society, 1955.
41. Schreckenberg., Kai Nagel and Michael. *A cellular automaton model for freeway traffic*. France : Journal de Physique I, 1992.
42. Herman, Ilya Prigogine and Robert. *Kinetic Theory of Vehicular Traffic*. New York : s.n., 1971.
43. Newell, Gordon F. *Memoirs on highway traffic flow theory in the 1950s*. 2002.
44. Greenshields, Bruce D. *A study of traffic capacity*. 1935.
45. Haight, F.A. *Mathematical theories of traffic flow*. 1963.
46. Newell., Gordon F. *A simplified theory of kinematic waves in highway traffic*. 1993.

8 Anhang

8.1 Anhang 1

Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	2436	🔍	loaded vehicles [#]	2436	🔍	loaded vehicles [#]	2436	🔍
insertion-backlogged vehicles [#]	370	🔍	insertion-backlogged vehicles [#]	355	🔍	insertion-backlogged vehicles [#]	397	🔍
departed vehicles [#]	2066	🔍	departed vehicles [#]	2081	🔍	departed vehicles [#]	2039	🔍
running vehicles [#]	134	🔍	running vehicles [#]	114	🔍	running vehicles [#]	130	🔍
arrived vehicles [#]	1932	🔍	arrived vehicles [#]	1967	🔍	arrived vehicles [#]	1909	🔍
discarded vehicles [#]	0	🔍	discarded vehicles [#]	0	🔍	discarded vehicles [#]	0	🔍
collisions [#]	0	🔍	collisions [#]	0	🔍	collisions [#]	0	🔍
teleports [#]	47	🔍	teleports [#]	6	🔍	teleports [#]	0	🔍
halting [#]	106	🔍	halting [#]	81	🔍	halting [#]	95	🔍
stopped [#]	0	🔍	stopped [#]	0	🔍	stopped [#]	0	🔍
avg. speed [m/s]	1.99	🔍	avg. speed [m/s]	1.42	🔍	avg. speed [m/s]	1.23	🔍
avg. relative speed	0.15	🔍	avg. relative speed	0.10	🔍	avg. relative speed	0.09	🔍
end time [s]	-1	✗	end time [s]	-1	✗	end time [s]	-1	✗
begin time [s]	0	✗	begin time [s]	0	✗	begin time [s]	0	✗
step duration [ms]	391	🔍	step duration [ms]	531	🔍	step duration [ms]	579	🔍
FPS	90.91	🔍	FPS	250.00	🔍	FPS	111.11	🔍
simulation duration [ms]	3	🔍	simulation duration [ms]	2	🔍	simulation duration [ms]	3	🔍
idle duration [ms]	388	🔍	idle duration [ms]	529	🔍	idle duration [ms]	576	🔍
duration factor	333.33	🔍	duration factor	500.00	🔍	duration factor	333.33	🔍
updates per second	44666.67	🔍	updates per second	57000.00	🔍	updates per second	43333.33	🔍
avg. updates per second	78008.46	🔍	avg. updates per second	93647.85	🔍	avg. updates per second	95357.53	🔍
nodes [#]	132	✗	nodes [#]	132	✗	nodes [#]	132	✗
edges [#]	235	✗	edges [#]	235	✗	edges [#]	235	✗
total edge length [km]	16.32	✗	total edge length [km]	16.32	✗	total edge length [km]	16.32	✗
total lane length [km]	17.99	✗	total lane length [km]	17.99	✗	total lane length [km]	17.99	✗
network version	1.90	✗	network version	1.90	✗	network version	1.90	✗

Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	2436	🔍	loaded vehicles [#]	2436	🔍	loaded vehicles [#]	2436	🔍
insertion-backlogged vehicles [#]	433	🔍	insertion-backlogged vehicles [#]	551	🔍	insertion-backlogged vehicles [#]	718	🔍
departed vehicles [#]	2003	🔍	departed vehicles [#]	1885	🔍	departed vehicles [#]	1718	🔍
running vehicles [#]	146	🔍	running vehicles [#]	142	🔍	running vehicles [#]	104	🔍
arrived vehicles [#]	1857	🔍	arrived vehicles [#]	1743	🔍	arrived vehicles [#]	1614	🔍
discarded vehicles [#]	0	🔍	discarded vehicles [#]	0	🔍	discarded vehicles [#]	0	🔍
collisions [#]	0	🔍	collisions [#]	0	🔍	collisions [#]	0	🔍
teleports [#]	3	🔍	teleports [#]	0	🔍	teleports [#]	0	🔍
halting [#]	106	🔍	halting [#]	123	🔍	halting [#]	82	🔍
stopped [#]	0	🔍	stopped [#]	0	🔍	stopped [#]	0	🔍
avg. speed [m/s]	2.00	🔍	avg. speed [m/s]	1.09	🔍	avg. speed [m/s]	1.16	🔍
avg. relative speed	0.15	🔍	avg. relative speed	0.08	🔍	avg. relative speed	0.09	🔍
end time [s]	-1	✗	end time [s]	-1	✗	end time [s]	-1	✗
begin time [s]	0	✗	begin time [s]	0	✗	begin time [s]	0	✗
step duration [ms]	550	🔍	step duration [ms]	422	🔍	step duration [ms]	376	🔍
FPS	76.92	🔍	FPS	90.91	🔍	FPS	333.33	🔍
simulation duration [ms]	5	🔍	simulation duration [ms]	4	🔍	simulation duration [ms]	2	🔍
idle duration [ms]	545	🔍	idle duration [ms]	418	🔍	idle duration [ms]	374	🔍
duration factor	200.00	🔍	duration factor	250.00	🔍	duration factor	500.00	🔍
updates per second	29200.00	🔍	updates per second	35500.00	🔍	updates per second	52000.00	🔍
avg. updates per second	71467.17	🔍	avg. updates per second	88486.23	🔍	avg. updates per second	77349.16	🔍
nodes [#]	132	✗	nodes [#]	132	✗	nodes [#]	132	✗
edges [#]	235	✗	edges [#]	235	✗	edges [#]	235	✗
total edge length [km]	16.32	✗	total edge length [km]	16.32	✗	total edge length [km]	16.32	✗
total lane length [km]	17.99	✗	total lane length [km]	17.99	✗	total lane length [km]	17.99	✗
network version	1.90	✗	network version	1.90	✗	network version	1.90	✗

Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	2436	🔍	loaded vehicles [#]	2436	🔍	loaded vehicles [#]	2436	🔍
insertion-backlogged vehicles [#]	938	🔍	insertion-backlogged vehicles [#]	1171	🔍	insertion-backlogged vehicles [#]	1374	🔍
departed vehicles [#]	1498	🔍	departed vehicles [#]	1265	🔍	departed vehicles [#]	1062	🔍
running vehicles [#]	97	🔍	running vehicles [#]	88	🔍	running vehicles [#]	77	🔍
arrived vehicles [#]	1401	🔍	arrived vehicles [#]	1177	🔍	arrived vehicles [#]	985	🔍
discarded vehicles [#]	0	🔍	discarded vehicles [#]	0	🔍	discarded vehicles [#]	0	🔍
collisions [#]	0	🔍	collisions [#]	0	🔍	collisions [#]	0	🔍
teleports [#]	0	🔍	teleports [#]	0	🔍	teleports [#]	1	🔍
halting [#]	85	🔍	halting [#]	73	🔍	halting [#]	66	🔍
stopped [#]	0	🔍	stopped [#]	0	🔍	stopped [#]	0	🔍
avg. speed [m/s]	1.12	🔍	avg. speed [m/s]	2.09	🔍	avg. speed [m/s]	0.69	🔍
avg. relative speed	0.09	🔍	avg. relative speed	0.15	🔍	avg. relative speed	0.05	🔍
end time [s]	-1	❌	end time [s]	-1	❌	end time [s]	-1	❌
begin time [s]	0	❌	begin time [s]	0	❌	begin time [s]	0	❌
step duration [ms]	221	🔍	step duration [ms]	504	🔍	step duration [ms]	1502	🔍
FPS	76.92	🔍	FPS	83.33	🔍	FPS	111.11	🔍
simulation duration [ms]	3	🔍	simulation duration [ms]	4	🔍	simulation duration [ms]	5	🔍
idle duration [ms]	218	🔍	idle duration [ms]	500	🔍	idle duration [ms]	1497	🔍
duration factor	333.33	🔍	duration factor	250.00	🔍	duration factor	200.00	🔍
updates per second	32333.33	🔍	updates per second	22000.00	🔍	updates per second	15400.00	🔍
avg. updates per second	70668.88	🔍	avg. updates per second	64305.06	🔍	avg. updates per second	78893.50	🔍
nodes [#]	132	❌	nodes [#]	132	❌	nodes [#]	132	❌
edges [#]	235	❌	edges [#]	235	❌	edges [#]	235	❌
total edge length [km]	16.32	❌	total edge length [km]	16.32	❌	total edge length [km]	16.32	❌
total lane length [km]	17.99	❌	total lane length [km]	17.99	❌	total lane length [km]	17.99	❌
network version	1.90	❌	network version	1.90	❌	network version	1.90	❌

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	2436	🔍
insertion-backlogged vehicles [#]	1555	🔍
departed vehicles [#]	881	🔍
running vehicles [#]	89	🔍
arrived vehicles [#]	792	🔍
discarded vehicles [#]	0	🔍
collisions [#]	0	🔍
teleports [#]	18	🔍
halting [#]	83	🔍
stopped [#]	0	🔍
avg. speed [m/s]	0.87	🔍
avg. relative speed	0.06	🔍
end time [s]	-1	❌
begin time [s]	0	❌
step duration [ms]	251	🔍
FPS	83.33	🔍
simulation duration [ms]	3	🔍
idle duration [ms]	248	🔍
duration factor	333.33	🔍
updates per second	29666.67	🔍
avg. updates per second	76412.31	🔍
nodes [#]	132	❌
edges [#]	235	❌
total edge length [km]	16.32	❌
total lane length [km]	17.99	❌
network version	1.90	❌

8.2 Anhang 2

Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	90000		loaded vehicles [#]	90000		loaded vehicles [#]	90000	
insertion-backlogged vehicles [#]	87607		insertion-backlogged vehicles [#]	87668		insertion-backlogged vehicles [#]	88459	
departed vehicles [#]	2393		departed vehicles [#]	2332		departed vehicles [#]	1541	
running vehicles [#]	127		running vehicles [#]	120		running vehicles [#]	116	
arrived vehicles [#]	2266		arrived vehicles [#]	2212		arrived vehicles [#]	1425	
discarded vehicles [#]	0		discarded vehicles [#]	0		discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0		collisions [#]	0		collisions [#]	0	
teleports [#]	5		teleports [#]	2		teleports [#]	0	
halting [#]	110		halting [#]	108		halting [#]	110	
stopped [#]	0		stopped [#]	0		stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	0.50		avg. speed [m/s]	0.26		avg. speed [m/s]	0.16	
avg. relative speed	0.04		avg. relative speed	0.03		avg. relative speed	0.02	
end time [s]	-1		end time [s]	-1		end time [s]	-1	
begin time [s]	0		begin time [s]	0		begin time [s]	0	
step duration [ms]	553		step duration [ms]	774		step duration [ms]	1413	
FPS	200.00		FPS	166.67		FPS	200.00	
simulation duration [ms]	57		simulation duration [ms]	89		simulation duration [ms]	39	
idle duration [ms]	496		idle duration [ms]	685		idle duration [ms]	1374	
duration factor	17.54		duration factor	11.24		duration factor	25.64	
updates per second	2228.07		updates per second	1348.31		updates per second	2974.36	
avg. updates per second	4544.45		avg. updates per second	4642.24		avg. updates per second	5567.34	
nodes [#]	564		nodes [#]	564		nodes [#]	564	
edges [#]	990		edges [#]	990		edges [#]	990	
total edge length [km]	41.32		total edge length [km]	41.32		total edge length [km]	41.32	
total lane length [km]	43.00		total lane length [km]	43.00		total lane length [km]	43.00	
network version	1.90		network version	1.90		network version	1.90	

Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	90000		loaded vehicles [#]	90000		loaded vehicles [#]	90000	
insertion-backlogged vehicles [#]	88342		insertion-backlogged vehicles [#]	88247		insertion-backlogged vehicles [#]	88144	
departed vehicles [#]	1658		departed vehicles [#]	1753		departed vehicles [#]	1856	
running vehicles [#]	145		running vehicles [#]	129		running vehicles [#]	134	
arrived vehicles [#]	1513		arrived vehicles [#]	1624		arrived vehicles [#]	1722	
discarded vehicles [#]	0		discarded vehicles [#]	0		discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0		collisions [#]	0		collisions [#]	0	
teleports [#]	0		teleports [#]	0		teleports [#]	0	
halting [#]	134		halting [#]	114		halting [#]	125	
stopped [#]	0		stopped [#]	0		stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	0.29		avg. speed [m/s]	0.80		avg. speed [m/s]	0.27	
avg. relative speed	0.03		avg. relative speed	0.07		avg. relative speed	0.03	
end time [s]	-1		end time [s]	-1		end time [s]	-1	
begin time [s]	0		begin time [s]	0		begin time [s]	0	
step duration [ms]	1439		step duration [ms]	471		step duration [ms]	1973	
FPS	250.00		FPS	200.00		FPS	166.67	
simulation duration [ms]	68		simulation duration [ms]	40		simulation duration [ms]	39	
idle duration [ms]	1371		idle duration [ms]	431		idle duration [ms]	1934	
duration factor	14.71		duration factor	25.00		duration factor	25.64	
updates per second	2132.35		updates per second	3225.00		updates per second	3435.90	
avg. updates per second	5487.68		avg. updates per second	5382.99		avg. updates per second	5220.24	
nodes [#]	564		nodes [#]	564		nodes [#]	564	
edges [#]	990		edges [#]	990		edges [#]	990	
total edge length [km]	41.32		total edge length [km]	41.32		total edge length [km]	41.32	
total lane length [km]	43.00		total lane length [km]	43.00		total lane length [km]	43.00	
network version	1.90		network version	1.90		network version	1.90	

Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	90000		loaded vehicles [#]	90000		loaded vehicles [#]	90000	
insertion-backlogged vehicles [#]	87984		insertion-backlogged vehicles [#]	87894		insertion-backlogged vehicles [#]	87830	
departed vehicles [#]	2016		departed vehicles [#]	2106		departed vehicles [#]	2170	
running vehicles [#]	139		running vehicles [#]	146		running vehicles [#]	129	
arrived vehicles [#]	1877		arrived vehicles [#]	1960		arrived vehicles [#]	2041	
discarded vehicles [#]	0		discarded vehicles [#]	0		discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0		collisions [#]	0		collisions [#]	0	
teleports [#]	0		teleports [#]	0		teleports [#]	0	
halting [#]	123		halting [#]	138		halting [#]	118	
stopped [#]	0		stopped [#]	0		stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	0.67		avg. speed [m/s]	0.20		avg. speed [m/s]	0.19	
avg. relative speed	0.05		avg. relative speed	0.02		avg. relative speed	0.02	
end time [s]	-1	✗	end time [s]	-1	✗	end time [s]	-1	✗
begin time [s]	0	✗	begin time [s]	0	✗	begin time [s]	0	✗
step duration [ms]	655		step duration [ms]	510		step duration [ms]	663	
FPS	125.00		FPS	200.00		FPS	66.67	
simulation duration [ms]	40		simulation duration [ms]	75		simulation duration [ms]	39	
idle duration [ms]	615		idle duration [ms]	435		idle duration [ms]	624	
duration factor	25.00		duration factor	13.33		duration factor	25.64	
updates per second	3475.00		updates per second	1946.67		updates per second	3307.69	
avg. updates per second	5091.13		avg. updates per second	5083.24		avg. updates per second	4812.48	
nodes [#]	564	✗	nodes [#]	564	✗	nodes [#]	564	✗
edges [#]	990	✗	edges [#]	990	✗	edges [#]	990	✗
total edge length [km]	41.32	✗	total edge length [km]	41.32	✗	total edge length [km]	41.32	✗
total lane length [km]	43.00	✗	total lane length [km]	43.00	✗	total lane length [km]	43.00	✗
network version	1.90	✗	network version	1.90	✗	network version	1.90	✗

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	90000	
insertion-backlogged vehicles [#]	87747	
departed vehicles [#]	2253	
running vehicles [#]	134	
arrived vehicles [#]	2119	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	121	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	0.34	
avg. relative speed	0.03	
end time [s]	-1	✗
begin time [s]	0	✗
step duration [ms]	630	
FPS	66.67	
simulation duration [ms]	74	
idle duration [ms]	556	
duration factor	13.51	
updates per second	1810.81	
avg. updates per second	4791.42	
nodes [#]	564	✗
edges [#]	990	✗
total edge length [km]	41.32	✗
total lane length [km]	43.00	✗
network version	1.90	✗

8.3 Anhang 3

Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	414	🔒	loaded vehicles [#]	414	🔒	loaded vehicles [#]	414	🔒
insertion-backlogged vehicles [#]	83	🔒	insertion-backlogged vehicles [#]	1	🔒	insertion-backlogged vehicles [#]	0	🔒
departed vehicles [#]	331	🔒	departed vehicles [#]	413	🔒	departed vehicles [#]	414	🔒
running vehicles [#]	20	🔒	running vehicles [#]	17	🔒	running vehicles [#]	5	🔒
arrived vehicles [#]	311	🔒	arrived vehicles [#]	396	🔒	arrived vehicles [#]	409	🔒
discarded vehicles [#]	0	🔒	discarded vehicles [#]	0	🔒	discarded vehicles [#]	0	🔒
collisions [#]	0	🔒	collisions [#]	0	🔒	collisions [#]	0	🔒
teleports [#]	3	🔒	teleports [#]	0	🔒	teleports [#]	0	🔒
halting [#]	17	🔒	halting [#]	14	🔒	halting [#]	3	🔒
stopped [#]	0	🔒	stopped [#]	0	🔒	stopped [#]	0	🔒
avg. speed [m/s]	0.28	🔒	avg. speed [m/s]	0.38	🔒	avg. speed [m/s]	1.16	🔒
avg. relative speed	0.02	🔒	avg. relative speed	0.03	🔒	avg. relative speed	0.08	🔒
end time [s]	-1	🔴	end time [s]	-1	🔴	end time [s]	-1	🔴
begin time [s]	0	🔴	begin time [s]	0	🔴	begin time [s]	0	🔴
step duration [ms]	593	🔒	step duration [ms]	515	🔒	step duration [ms]	641	🔒
FPS	333.33	🔒	FPS	250.00	🔒	FPS	250.00	🔒
simulation duration [ms]	1	🔒	simulation duration [ms]	1	🔒	simulation duration [ms]	1	🔒
idle duration [ms]	592	🔒	idle duration [ms]	514	🔒	idle duration [ms]	640	🔒
duration factor	1000.00	🔒	duration factor	1000.00	🔒	duration factor	1000.00	🔒
updates per second	20000.00	🔒	updates per second	17000.00	🔒	updates per second	5000.00	🔒
avg. updates per second	36341.26	🔒	avg. updates per second	20645.76	🔒	avg. updates per second	22672.20	🔒
nodes [#]	564	🔴	nodes [#]	564	🔴	nodes [#]	564	🔴
edges [#]	990	🔴	edges [#]	990	🔴	edges [#]	990	🔴
total edge length [km]	41.32	🔴	total edge length [km]	41.32	🔴	total edge length [km]	41.32	🔴
total lane length [km]	43.00	🔴	total lane length [km]	43.00	🔴	total lane length [km]	43.00	🔴
network version	1.90	🔴	network version	1.90	🔴	network version	1.90	🔴

Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	414	🔒	loaded vehicles [#]	414	🔒	loaded vehicles [#]	414	🔒
insertion-backlogged vehicles [#]	0	🔒	insertion-backlogged vehicles [#]	0	🔒	insertion-backlogged vehicles [#]	0	🔒
departed vehicles [#]	414	🔒	departed vehicles [#]	414	🔒	departed vehicles [#]	414	🔒
running vehicles [#]	4	🔒	running vehicles [#]	4	🔒	running vehicles [#]	5	🔒
arrived vehicles [#]	410	🔒	arrived vehicles [#]	410	🔒	arrived vehicles [#]	409	🔒
discarded vehicles [#]	0	🔒	discarded vehicles [#]	0	🔒	discarded vehicles [#]	0	🔒
collisions [#]	0	🔒	collisions [#]	0	🔒	collisions [#]	0	🔒
teleports [#]	0	🔒	teleports [#]	0	🔒	teleports [#]	0	🔒
halting [#]	1	🔒	halting [#]	1	🔒	halting [#]	3	🔒
stopped [#]	0	🔒	stopped [#]	0	🔒	stopped [#]	0	🔒
avg. speed [m/s]	1.86	🔒	avg. speed [m/s]	2.02	🔒	avg. speed [m/s]	1.33	🔒
avg. relative speed	0.13	🔒	avg. relative speed	0.15	🔒	avg. relative speed	0.10	🔒
end time [s]	-1	🔴	end time [s]	-1	🔴	end time [s]	-1	🔴
begin time [s]	0	🔴	begin time [s]	0	🔴	begin time [s]	0	🔴
step duration [ms]	390	🔒	step duration [ms]	785	🔒	step duration [ms]	516	🔒
FPS	142.86	🔒	FPS	200.00	🔒	FPS	500.00	🔒
simulation duration [ms]	0	🔒	simulation duration [ms]	1	🔒	simulation duration [ms]	0	🔒
idle duration [ms]	390	🔒	idle duration [ms]	784	🔒	idle duration [ms]	516	🔒
duration factor	-1.00	🔒	duration factor	1000.00	🔒	duration factor	-1.00	🔒
updates per second	-1.00	🔒	updates per second	4000.00	🔒	updates per second	-1.00	🔒
avg. updates per second	21933.61	🔒	avg. updates per second	22127.39	🔒	avg. updates per second	15555.16	🔒
nodes [#]	564	🔴	nodes [#]	564	🔴	nodes [#]	564	🔴
edges [#]	990	🔴	edges [#]	990	🔴	edges [#]	990	🔴
total edge length [km]	41.32	🔴	total edge length [km]	41.32	🔴	total edge length [km]	41.32	🔴
total lane length [km]	43.00	🔴	total lane length [km]	43.00	🔴	total lane length [km]	43.00	🔴
network version	1.90	🔴	network version	1.90	🔴	network version	1.90	🔴

Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic	Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	414	🔒	loaded vehicles [#]	414	🔒	loaded vehicles [#]	414	🔒
insertion-backlogged vehicles [#]	0	🔒	insertion-backlogged vehicles [#]	0	🔒	insertion-backlogged vehicles [#]	0	🔒
departed vehicles [#]	414	🔒	departed vehicles [#]	414	🔒	departed vehicles [#]	414	🔒
running vehicles [#]	5	🔒	running vehicles [#]	5	🔒	running vehicles [#]	6	🔒
arrived vehicles [#]	409	🔒	arrived vehicles [#]	409	🔒	arrived vehicles [#]	408	🔒
discarded vehicles [#]	0	🔒	discarded vehicles [#]	0	🔒	discarded vehicles [#]	0	🔒
collisions [#]	0	🔒	collisions [#]	0	🔒	collisions [#]	0	🔒
teleports [#]	0	🔒	teleports [#]	0	🔒	teleports [#]	0	🔒
halting [#]	2	🔒	halting [#]	3	🔒	halting [#]	4	🔒
stopped [#]	0	🔒	stopped [#]	0	🔒	stopped [#]	0	🔒
avg. speed [m/s]	1.07	🔒	avg. speed [m/s]	1.29	🔒	avg. speed [m/s]	0.93	🔒
avg. relative speed	0.08	🔒	avg. relative speed	0.09	🔒	avg. relative speed	0.07	🔒
end time [s]	-1	🔴	end time [s]	-1	🔴	end time [s]	-1	🔴
begin time [s]	0	🔴	begin time [s]	0	🔴	begin time [s]	0	🔴
step duration [ms]	765	🔒	step duration [ms]	531	🔒	step duration [ms]	405	🔒
FPS	500.00	🔒	FPS	111.11	🔒	FPS	333.33	🔒
simulation duration [ms]	1	🔒	simulation duration [ms]	1	🔒	simulation duration [ms]	0	🔒
idle duration [ms]	764	🔒	idle duration [ms]	530	🔒	idle duration [ms]	405	🔒
duration factor	1000.00	🔒	duration factor	1000.00	🔒	duration factor	-1.00	🔒
updates per second	5000.00	🔒	updates per second	5000.00	🔒	updates per second	-1.00	🔒
avg. updates per second	18965.47	🔒	avg. updates per second	21818.11	🔒	avg. updates per second	17978.77	🔒
nodes [#]	564	🔴	nodes [#]	564	🔴	nodes [#]	564	🔴
edges [#]	990	🔴	edges [#]	990	🔴	edges [#]	990	🔴
total edge length [km]	41.32	🔴	total edge length [km]	41.32	🔴	total edge length [km]	41.32	🔴
total lane length [km]	43.00	🔴	total lane length [km]	43.00	🔴	total lane length [km]	43.00	🔴
network version	1.90	🔴	network version	1.90	🔴	network version	1.90	🔴

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	414	🔒
insertion-backlogged vehicles [#]	0	🔒
departed vehicles [#]	414	🔒
running vehicles [#]	62	🔒
arrived vehicles [#]	352	🔒
discarded vehicles [#]	0	🔒
collisions [#]	0	🔒
teleports [#]	1	🔒
halting [#]	59	🔒
stopped [#]	0	🔒
avg. speed [m/s]	0.26	🔒
avg. relative speed	0.02	🔒
end time [s]	-1	🔴
begin time [s]	0	🔴
step duration [ms]	578	🔒
FPS	100.00	🔒
simulation duration [ms]	1	🔒
idle duration [ms]	577	🔒
duration factor	1000.00	🔒
updates per second	62000.00	🔒
avg. updates per second	49016.99	🔒
nodes [#]	564	🔴
edges [#]	990	🔴
total edge length [km]	41.32	🔴
total lane length [km]	43.00	🔴
network version	1.90	🔴