



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Masterarbeit

Thema:

**Analyse und Verbesserung des Straßenverkehrs
an der Kreuzung Kalk Kapelle in Köln mithilfe des
Simulationstools SUMO**

Vorgelegt von Feres Yaiche (Matrikelnummer 1666529)

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

Zweitprüfer: M.Sc. Raphael Korbmacher

Wuppertal, den 20.09.2022

Diese Arbeit wurde vorgelegt im Fachgebiet für Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit

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

Eidesstattliche Versicherung

Erklärung zur selbständigen Erstellung der Arbeit

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



Unterschrift

Wuppertal, den 20.09.2022



Inhalt

Formelzeichen	IV
Abkürzungen.....	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Formelverzeichnis.....	VIII
1. Einleitung	1
1.1 Erläuterung der Problematik	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Methodik.....	2
2. Stand der Technik.....	4
2.1 Grundlagen der Verkehrstheorie	4
2.1.1 Verkehr	4
2.1.2 Anzahl der Fahrzeuge	5
2.1.3 Zeitnahme im Verkehr	5
2.1.4 Position eines Fahrzeuges	5
2.1.5 Fahrzeugabstand	7
2.2 Fundamentaldiagramm	11
2.2.1 Die Verkehrsvariablen	11
2.2.2 Dichte des Verkehrs	12
2.2.3 Verkehrsfluss	12
2.2.4 Geschwindigkeit.....	14
2.2.5 Mathematische Eigenschaften und Merkmale.....	15
2.2.6 Die drei Darstellungen des Fundamentaldiagramms	17
2.2.7 Kapazität	20
2.2.8 Stau, Nachfrage und Überlastung	22
2.2.9 Stau in Städten	23
2.2.10 Kennzeichnung von lokalen Überlastungen im Dauerverkehr	24
2.3 Dynamik des Verkehrs	25
2.3.1 Knotenpunkte.....	25
2.3.2 Kumulierte Abflüsse	26
2.3.3 Fahrzeit	27
3. Verkehrssimulation	30
3.1 Modelle der Verkehrssimulation.....	30
3.1.1 Mikroskopische Modelle	32
3.1.1.1 Mikroskopisches Längsmodell.....	34
3.1.1.2 Mikroskopisches Seitenmodell	35

3.1.2	Makroskopische Modelle	35
3.1.3	Mesoskopische Modelle	35
3.1.4	Modellierung und Simulation	36
3.2	Verkehrssimulation.....	37
3.2.1	Mögliche Tools zur Beeinflussung des Straßenverkehrs	37
3.2.1.1	Lichtzeichenanlage (LZA)	37
3.2.1.2	Kreisverkehr.....	43
3.2.1.3	Andere Möglichkeiten	44
3.3	SUMO.....	44
4.	Simulation und Ergebnisse	46
4.1	Entscheidung der Kreuzung.....	46
4.2	IST-Zustand.....	49
4.2.1	Parzellierung der verschiedenen Wege dieser Kreuzung	49
4.2.2	Bestimmung von Durchgangsmöglichkeiten für Fußgänger	50
4.2.3	Verkehrszählung an der Kreuzung Kalk Kapelle	51
4.3	Simulation von Szenarien	51
4.3.1	Bewertung der Genauigkeit der Simulation mit SUMO	51
4.3.1.1	Ursprung	52
4.3.1.2	Vorgehen	52
4.3.1.3	Durchführung	52
4.3.2	Szenario 1: Verschiebung der Grünphasen der Ampeln für Fußgänger	53
4.3.3	Änderung der Grün- und Zykluszeiten für Fahrzeuge	54
4.3.4	Szenario 2: Änderung der Grün- und Zykluszeiten für Fahrzeuge nur für die Kalkerhauptstraße	55
4.3.4.1	Suche der optimalen Grünzeit	55
4.3.4.2	Bewertung des optimalen Szenarios	57
4.3.5	Szenario 3: Änderung der Grün- und Zykluszeiten für Fahrzeuge nur für die Kapellenstraße	58
4.3.5.1	Suche der optimalen Grünzeit	58
4.3.5.2	Bewertung des optimalen Szenarios	60
4.3.6	Szenario 4: Änderung der Grün- und Zykluszeiten für Fahrzeuge für die Kalkerhauptstraße und die Kapellenstraße	61
4.3.6.1	Suche der optimalen Grünzeit	62
4.3.6.2	Bewertung des optimalen Szenarios	63
4.4	Szenario 5: Einrichtung eines Kreisverkehrs als Ersatz für die Ampeln für Fahrzeuge.....	64
4.5	Auswahl des geeigneten Szenarios.....	65
4.5.1	Zusammenfassung der Szenarien.....	66
4.5.2	Entscheidung der Lösung	66
5.	Fazit und Ausblick.....	67
6.	Literaturverzeichnis.....	69

A1	Bilder.....	71
A1.1	Kalk Kapelle nach Google Maps.....	72
A1.2	Kalk Kapelle nach Open Street Map.....	72
A1.3	Kalk Kapelle nach SUMO	73
A2	Ergebnisse	74
A 2.1	Kalker Hauptstraße +60s	74
A 2.2	Kalker Hauptstraße + 50s	74
A 2.3	Kalker Hauptstraße + 45s	75
A 2.4	Kalker Hauptstraße + 40s	75
A 2.5	Kalker Hauptstraße + 35s	76
A 2.6	Kalker Hauptstraße + 30s	76
A 2.7	Kalker Hauptstraße + 20s	77
A 2.8	Kalker Hauptstraße +10 s	77
A 2.9	Kapellenstraße +60 s	78
A 2.10	Kapellenstraße +50s	78
A 2.11	Kapellenstraße + 45s	79
A 2.12	Kapellenstraße + 40s	79
A 2.13	Kapellenstraße + 35s	80
A 2.14	Kapellenstraße +30s	80
A 2.15	Kapellenstraße +20s	81
A 2.16	Kapellenstraße + 10s	81
A 2.17	Kapellenstraße – 10s	82
A 2.18	Kapellenstraße – 15s	82
A 2.19	Kalker Hauptstraße + 50s, Kapellenstraße – 10s.....	83
A 2.20	Kalker Hauptstraße + 40s, Kapellenstraße -10s	83
A 2.21	Kalker Hauptstraße +40s, Kapellenstraße – 15s.....	84
A 2.22	Kalkerhauptstraße + 50s dann alles dividiert	84
A 2.23	Kalkerhauptstraße + 50s dann alles dividiert (Zyklus)	85
A 2.24	Sonntag.....	85
A 2.25	Kreisverkehr	86

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
Q	Kfz/h	Verkehrsfluss
N	Kfz	Anzahl der Fahrzeuge
Δ_t	h	Zeitraum
V	Km/h	Geschwindigkeit
K	Kfz/Km	Verkehrsdichte
X	Km	Position
Δ_x	Km	Distanz
C	Kfz/h	Kapazität
Q_{\max}	Kfz/h	Maximaler Verkehrsfluss
F		Funktion des Fundamental-Diagramms
K_{opt}	Kfz/km	Optimale bzw. maximale Verkehrsdichte
V_{krit}	Km/h	Kritische bzw. maximale Geschwindigkeit
t_z	h	Zyklusdauer
t_s	h	Dauer der Stillstandzeit während eines Zyklus

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
ABX	desired minimum following distance at low speed differences
AIMSUN	Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks
API	Application Programming Interface
CLVD	Decreasing speed difference
CORSIM	Corridor Simulation
FHWA	Federal Highway Administration
KFZ	Kraftfahrzeug
H	Stunde(n)
LZA	Lichtzeichenanlage
OPDV	The increasing speed difference
OSM	OpenStreetMap
PTV	Planung Transport Verkehr
SDV	Threshold
SDX	The maximum following distance
SEU	Subjective expected utility
SimCo	Simulation of the Governance of Complex Systems
SUMO	Simulation of Urban Mobility
XML	Extensible Markup Language
z.B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung eines Fahrzeugs auf einer dreispurigen Straße von oben nach den Längs- und Querkoordinaten x und y .	6
Abbildung 2: Betrachtung eines Fahrzeugs in zwei Dimensionen unter Berücksichtigung der Länge x und der Höhe z .	7
Abbildung 3: Inter-Fahrzeug-Distanz (spacing).	8
Abbildung 4: Lücke zwischen zwei Fahrzeugen (space gap).	9
Abbildung 5: Intervehikelzeit von zwei Fahrzeugen in der gleichen Position.	10
Abbildung 6: Time gap von zwei Fahrzeugen in der gleichen Position.	10
Abbildung 7: Q-K-Diagramm. (Elefteriadou, 2014)	18
Abbildung 8: V-Q-Diagramm. (Elefteriadou, 2014)	19
Abbildung 9: V-K-Diagramm. (Martin Treiber, 2010)	20
Abbildung 10: Erste Methode – Suche der Kapazität $C=Q_{\max}$ (Kerner, 2009).	21
Abbildung 11: Zweite Methode – Suche der Kapazität $C=Q_{\max}$. (Elefteriadou, 2014)	22
Abbildung 12: Entwicklung des kumulierten Durchflusses im Laufe der Zeit. (Dallmeyer, 2014)	27
Abbildung 13: Angekündigte und realisierte Fahrzeiten eines Fahrzeugs.	28
Abbildung 14: Darstellung von einem Netz mit mehreren Knotenpunkten. (Holzapfel, 2020)	31
Abbildung 15: Reaktion von Fahrzeugen zum Anfahren beim Umschalten der Ampel auf Grün....	40
Abbildung 16: Dynamische Verwaltung der Grünlichtdauer. (Proff, 2020)	41
Abbildung 17: Überblick über den Stadtteil Kalk und seinen Kernbereich (Google maps)	47
Abbildung 18: Kreuzung Kalk Kapelle	48
Abbildung 19: Parzellierung der verschiedenen möglichen Richtungen in der Kreuzung Kalk Kapelle.	50
Abbildung 20: Fußgänger in Kalk Kapelle	50
Abbildung 21: Verschiebungen der grünen Ampeln für Fußgänger in SUMO.	54
Abbildung 22: Verkehrsfluss in Bezug auf die grüne Ampelzeit.	56
Abbildung 23: Verkehrsgeschwindigkeit in Bezug auf die grüne Ampelzeit	56
Abbildung 24: Verkehrsfluss in Bezug auf die grüne Ampelzeit.	59
Abbildung 25: Verkehrsgeschwindigkeit in Bezug auf die grüne Ampelzeit	60
Abbildung 26: Kreuzung Kalk Kapelle in einen Kreisverkehr umgewandelt	64
Abbildung 27: Kreisverkehr mit 5000 Kfz/Std pro Spur.	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Darstellung der verschiedenen Arten von Knotenpunkten (Wolfgang Pietzsch, 2000)...	26
Tabelle 2: Nachteile und Vorteile der LZA. (Dallmeyer, 2014).....	39
Tabelle 3: Vorteile und Nachteile des Kreisverkehrs. (VERKEHRSWESSEN, 2021).....	43
Tabelle 4: Verkehrsfluss Kalk Kapelle	51
Tabelle 5: Verlängerung der grünen Ampelzeiten für a, b und g.....	55
Tabelle 6: Ergebnisse der zehn Iterationen mit dem optimalen Ergebnis in Kalkerhauptstraße.....	57
Tabelle 7: Standardabweichung der optimalen Lösung für Grünzeit Kalkerhauptstraße.....	57
Tabelle 8: Konfidenzintervall der optimalen Lösung für Grünzeit Kalkerhauptstraße	58
Tabelle 9: Gewählte Lösung für Szenario 2.....	58
Tabelle 10: Verlängerung der grünen Ampelzeiten für c und d.....	59
Tabelle 11: Ergebnisse der zehn Iterationen mit dem optimalen Ergebnis in Kapellenstraße	61
Tabelle 12: Standardabweichung der optimalen Lösung für Grünzeit Kapellenstraße.....	61
Tabelle 13: Gewählte Lösung für Szenario 3.....	61
Tabelle 14: Kombinierte Anpassung der Dauer der grünen Ampel.....	62
Tabelle 15: Ergebnisse der zehn Iterationen mit dem optimalen Ergebnis in Kapellenstraße gemischt mit Kalkerhauptstraße	63
Tabelle 16: Standardabweichung der optimalen Lösung für Grünzeit Kapellenstraße und Kalkerhauptstraße.....	63
Tabelle 17: Gewählte Lösung für Szenario 4.....	64
Tabelle 18: Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien	66

Formelverzeichnis

Formel 1: Verkehrsdichte	12
Formel 2: Verkehrsfluss	13
Formel 3: Geschwindigkeit.....	14
Formel 4: durchschnittliche Geschwindigkeit.....	14
Formel 5: Geschwindigkeit in Bezug auf Dichte und Fluss	15
Formel 6: Gleichung für die Erhaltung von Fahrzeugen	15
Formel 7: Hyperbolische Gleichung nach der DichtevARIABLE K.....	16
Formel 8: Beziehung Durchfluss und Dichte	16
Formel 9: Fundamentaldiagramm zwischen Durchfluss, Dichte und Geschwindigkeit.....	17
Formel 10: Gleichung des kritischen Punktes	19
Formel 11: Kapazität des Knotenpunktes.....	42
Formel 12: Durchschnitt.....	53
Formel 13: Standardabweichung	53
Formel 14: Konfidenzintervalle.....	53



1. Einleitung

In dieser Einleitung wird die Problematik erläutert, ein Ziel definiert und die Methode festgelegt, die zur Erreichung dieses Ziels verwendet werden soll.

1.1 Erläuterung der Problematik

Im Laufe der letzten Jahrhunderte hat sich die Mobilität massiv weiterentwickelt. Dabei sind Ansprüche an die heutige, moderne Mobilität sehr umfassend und multidimensional: Menschen haben konkrete Vorstellungen von Mobilität, die z.B. von Annehmlichkeit und Leichtigkeit über Geschwindigkeit und Termintreue bis hin zu einem erhöhten ökologischen Verantwortungsgefühl reichen und mit den Mobilitätsanforderungen in Einklang gebracht werden. (Leyn, 2018)

Das Bedürfnis nach Mobilität hat die Menschen dazu gebracht, Transportmittel zu entwickeln. In der Folge haben sich die Verkehrsmittel über die Zeit weiterentwickelt. Gleichzeitig mussten Wege und Straßen angelegt werden, um den Verkehr dieser Transportmittel und Fahrzeuge, insbesondere Landfahrzeuge, zu ermöglichen. Ein solches Straßennetz soll es seinen Nutzern ermöglichen, von einem Punkt zum anderen zu gelangen. Es besteht aus einer Reihe von Straßen mit mehr oder weniger Fahrspuren, abhängig von den Aktivitätszonen und Wohngebieten. Da Kreuzungen zwischen Straßen in einem städtischen Umfeld aufgrund ihrer Konzentration unvermeidlich sind, ermöglichen sie die Steuerung der Ströme von Fahrzeugen, die miteinander in Konflikt geraten, um ihre Sicherheit zu gewährleisten, ein Zusammenstoßen zu vermeiden und den Autofahrern das Wechseln der Route zu ermöglichen. Diese Kreuzungen oder auch Kreisverkehre regeln den Verkehr und wenden im Allgemeinen Vorfahrtsregeln an oder sind mit Ampeln ausgestattet, um besonders gefährliche Situationen zu bewältigen. Das städtische Straßennetz kann daher als eine Ansammlung von Kreuzungen betrachtet werden, die durch Straßen miteinander verbunden sind und zu denen betriebliche Elemente hinzugefügt werden können. Insbesondere in urbanen Gebieten hat der Verkehr innerhalb weniger Jahre massiv zugenommen. So steht der Verkehr in städtischen im Mittelpunkt vieler Probleme. Diese Probleme kosten Zeit, Geld, Gesundheit und Umweltqualität, etwa durch Staus, Unfälle oder Verkehrsverstöße. (Moltenbrey, 2020)

Um für solche Probleme möglichst effektive Lösungen zu finden, hat die Verkehrssimulation bei Verkehrsforschern immer mehr Beachtung gefunden. Vieles, wie z. B. die Verwaltung

von Staus und Kreuzungsprioritäten, können aufgrund ihrer Komplexität nicht mit herkömmlichen Analysewerkzeugen gelöst werden. Verkehrssimulatoren ermöglichen die Untersuchung des gesamten Straßensystems und die Bewertung verschiedener Verkehrsmanagementalternativen, um optimale Lösungen für verschiedene Szenarien, die im Verkehr auftreten können, zu ermitteln. (Eckehard Schnieder, 2013)

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Masterarbeit ist es, das Management von Straßennetzen und Straßenverkehr an einer in Planung befindlichen Kreuzung in Solingen mit Hilfe von Simulationstechniken und einer eigens dafür entwickelten Plattform zu optimieren, dem SUMO-Programm. Das Ziel ist es, Staus zu reduzieren, den Arbeits-, Kosten- und Zeitaufwand für die Verkehrsteilnehmer zu verringern und gleichzeitig die Sicherheit aller Beteiligten am Straßenverkehr und an den Straßennetzen zu gewährleisten. Diese Verkehrsteilnehmer sind Autofahrer, Fahrradfahrer, Nutzer von Rollern und ähnlichen Verkehrsmitteln, LKW-Fahrer, Fußgänger und öffentliche Nutzer (beispielsweise Krankenwagen oder Polizei)

Für die Lösungsentwicklung der Kreuzung Kalk Kapelle in Köln werden zunächst verschiedene theoretische Modelle des Straßenverkehrsmanagements vorgestellt. Auch wird die Erforschung verschiedener Simulationsprogramme dargestellt und miteinander verglichen. Anschließend werden diese Erkenntnisse in die Simulation und Lösungsfindung einer in Planung befindlichen Kreuzung in Solingen einfließen. Ziel ist es, diese Kreuzung mithilfe des Simulationsprogramms SUMO zu optimieren.

1.3 Methodik

Als erstes wird im zweiten Abschnitt dieser Arbeit der aktuelle Stand der Technik erläutert. Dabei werden Begriffe und Grundlagen der Verkehrsmanagement- und Straßennetz-Theorie eingeführt. Dem Stand der Technik folgt ein Abschnitt über zwei theoretische Modelle des Verkehrsflusses: das mikroskopische und das makroskopische Modell sowie die Möglichkeit, die Auswirkungen der Verkehrsvariabilität in diesen verschiedenen Modellen zu berücksichtigen. Anschließend werden verschiedene Softwareprogramme zur Modellierung und Simulation verschiedener Verkehrsflussmodelle und Straßennetze vorgestellt. Diese werden miteinander verglichen, um so Vor- und Nachteile der Programme ausfindig zu machen und die Auswahl zu begründen.

Im vierten Abschnitt wird der Fall vorgestellt, der für diese Arbeit ausgewählt wurde: die Kreuzung in Solingen. Darin werden die Daten für diesen Fall vorgestellt und mit den in Abschnitt 2 vorgestellten theoretischen Modellen ausgewertet. In diesem Abschnitt werden auch die Problematik des untersuchten Falles und die Komplexität der Parameter erläutert.

Der fünfte Abschnitt konzentriert sich auf die Modellierung und Simulation des ausgewählten und in Abschnitt 4 vorgestellten Falls mit der in Abschnitt 3 ausgewählten Software (SUMO). Anschließend folgt im sechsten Abschnitt eine Auswertung der Ergebnisse der Simulation sowie ein Lösungsvorschlag zur Optimierung der untersuchten Kreuzung. Im letzten Abschnitt werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

2. Stand der Technik

In diesem Abschnitt wird der Stand der Technik im Bereich des Verkehrsmanagements mithilfe intelligenter Verkehrssysteme vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Steuerung von Ampeln und Kreisverkehren, gefolgt von Aspekten verteilter Systeme. Zunächst werden die bestehenden Klassen von Verkehrsmodellen beschrieben. Danach wird die Funktionsweise einer Ampelkreuzung erläutert und das klassische Modell sowie die Metriken und Parameter, die traditionell verwendet werden (z. B. die Grünzeit), werden definiert. Anschließend werden intelligente Verkehrssysteme und ihre Anwendung auf Ampelsteuerungssysteme und Alternativen charakterisiert.

2.1 Grundlagen der Verkehrstheorie

Nachfolgend werden die Grundlagen der Theorie des Verkehrs und der Straßennetze definiert.

2.1.1 Verkehr

Verkehr ist definiert als der Transport von Personen und/oder Gegenständen von einem geografischen Ausgangsort, dem sogenannten Ursprung, zu einem anderen Zielort, dem sogenannten Bestimmungsort. Der Transportprozess wird als das Zurücklegen eines bestimmten Weges definiert, der den Ursprung mit dem Ziel verbindet. Der Straßenverkehr ergibt sich aus der Summe der individuellen Verhaltensweisen der Verkehrsteilnehmer, die von ihren Ausgangsorten zu einem bestimmten Zielort gelangen wollen. Als Straßenverkehr gilt derjenige Verkehr, der auf dem Land stattfindet, ohne an Schienen oder Wasserwege gebunden zu sein. Unabhängig von den benutzten Verkehrsmitteln gehört zum Straßenverkehr grundsätzlich auch der Fußgänger-, Fahrrad-, Motorrad- sowie der Privatverkehr mit Personenkraftwagen. (Holzapfel, 2020)

Im Straßenverkehr gibt es zwei Hauptarten von Verkehr: Individualverkehr und öffentlicher Verkehr. Individualverkehr bezeichnet jede Beförderung von Personen oder Gütern zu nicht kommerziellen Zwecken mit einem privaten Fahrzeug (PKW, LKW, Tretroller, Fahrrad, Motorrad etc.). Der öffentliche Personennahverkehr (oder ÖPNV) ist ein Verkehrsmittel, bei dem mehrere Personen gemeinsam auf einer Strecke befördert werden. Er ist in der Regel mit einer Fahrkarte wie einem Fahrschein, einem Ticket oder einem Abonnement zugänglich. (Peter Hennicke, 2021)

Gerade in Ballungsräumen stoßen diese beiden Arten des Verkehrs regelmäßig an ihre Grenzen. Zwar ist es nicht ausgeschlossen, dass Verkehrsteilnehmer auch in kleineren Orten unter Staus oder Langsamkeit im Verkehr leiden. Jedoch sind Großstädte aufgrund der höheren Verkehrsdichte wesentlich stärker betroffen. (Peter Henricke, 2021)

2.1.2 Anzahl der Fahrzeuge

Nachfolgend wird die Anzahl der beobachteten Fahrzeuge mit „N“ dargestellt. „N“ steht für eine natürliche Zahl und wird berechnet, indem man die Anzahl der Fahrzeuge beobachtet, die eine bestimmte Strecke in einer bestimmten Zeit zurückgelegt haben. (Leyn, 2018)

2.1.3 Zeitnahme im Verkehr

Der Zeitpunkt, an dem eine Beobachtung eingefroren und aufgenommen wird, wird mit t angegeben. Δt beschreibt die Zeit, die zwischen zwei Zeitpunkten (z. B. t und $t + \Delta t$) vergeht. (Kerner, 2009)

2.1.4 Position eines Fahrzeuges

Die Fahrspur eines Fahrzeuges ist die Gesamtheit der aufeinanderfolgenden Punkte des Raums, den es einnimmt, begleitet von den Zeitpunkten t der Durchfahrt durch diese Punkte. Jeder Punkt der Trajektorie kann also in einem vierdimensionalen Raum geortet werden: x, y, z und die Zeit t . In der Regel wird jedoch eine krummlinige Abszisse verwendet: x ist die Längsposition, y die Querposition.

In der Abbildung 1 ist das Bild eines Fahrzeugs auf einer dreispurigen Straße zu sehen. x gibt die Position in Kilometern des vorwärtsfahrenden Autos an. „ y “ gibt die Nummer der Spur an, auf der das Auto fährt (hier auf der zweiten Spur):

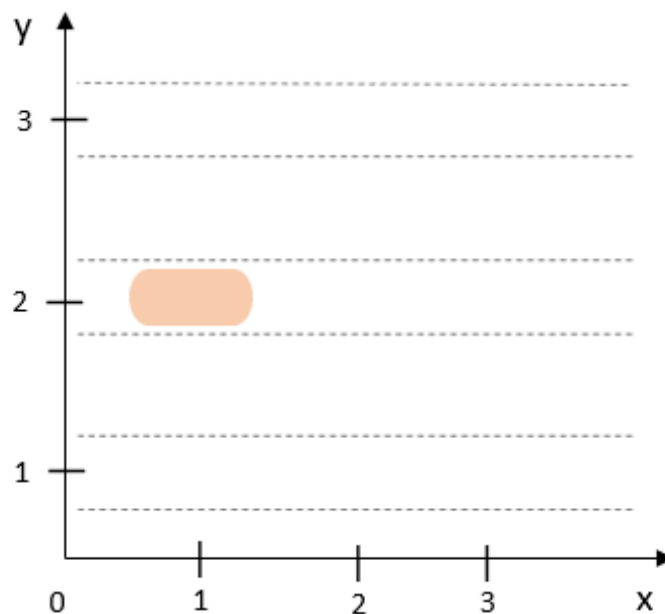


Abbildung 1: Darstellung eines Fahrzeugs auf einer dreispurigen Straße von oben nach den Längs- und Querkoordinaten x und y .

Die Höhe „ z “ wird vernachlässigt, da die Fahrzeuge, die sich längs und seitlich bewegen, den Straßenverkehr nicht über ihre Höhe beeinflussen. Aus diesem Grund ist eine zweidimensionale Betrachtung unter Berücksichtigung der Koordinaten (x, z) oder (y, z) wenig aussagenkräftig, wie Abbildung 2 verdeutlicht. Natürlich bleibt die Höhe eines Fahrzeugs in besonderen Fällen wichtig. Das ist beispielsweise der Fall bei Brücken, Tunnel oder Oberleitungen, die für hohe Fahrzeuge wie LKWs oder Busse zum Hindernis werden können. (Elefteriadou, 2014)

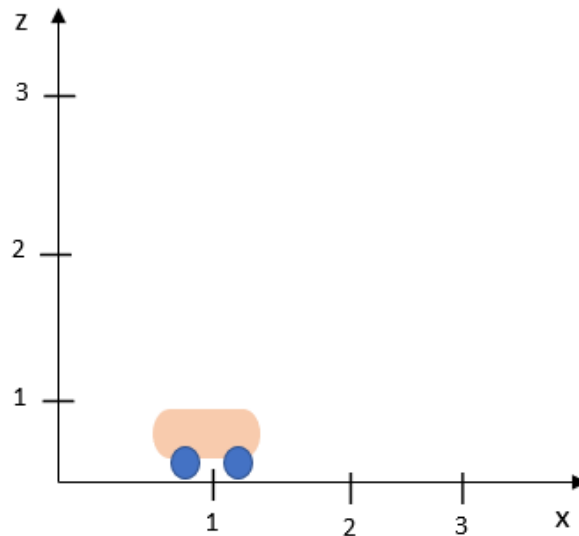


Abbildung 2: Betrachtung eines Fahrzeugs in zwei Dimensionen unter Berücksichtigung der Länge x und der Höhe z .

2.1.5 Fahrzeugabstand

Wenn zwei Fahrzeuge hintereinanderfahren, spricht man von einem führenden bzw. verfolgten Fahrzeug und einem nachfolgenden Fahrzeug. Man kann sie auf zwei Arten beobachten, die sich gegenseitig ergänzen: an einer bestimmten Position oder an einem bestimmten Zeitpunkt.

Die Länge jedes Fahrzeugs wird hier als gleich angenommen.

a) Räumlicher Abstand zwischen zwei Fahrzeugen

In diesem Fall wird der physische Abstand zwischen zwei Fahrzeugen gemessen. Dazu wird ein Zeitreferenzpunkt t (im folgenden Beispiel t_1) gesetzt, der für beide Fahrzeuge gleich ist. Hier kann die Länge des Fahrzeugs auf zwei Arten berücksichtigt werden (Dallmeyer, 2014):

- Der Abstand oder die Inter-Fahrzeug-Distanz (das ist der Abstand zwischen den jeweiligen Vorderseiten zweier Fahrzeuge, auch „spacing“ genannt). Abbildung 3 zeigt diesen Abstand. Dabei sind die Punkte x_1 und x_3 die jeweiligen Vorderseiten der beiden Fahrzeuge.

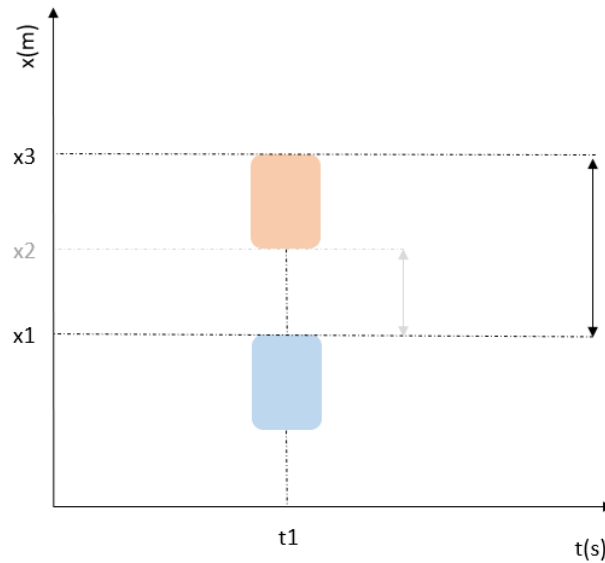


Abbildung 3: Inter-Fahrzeug-Distanz (spacing).

- Der Abstand kann auch die Lücke („space gap“) zwischen zwei Fahrzeugen sein. Diese Lücke wird vom Heck des führenden Fahrzeugs zur Front des nachfolgenden Fahrzeugs gemessen. Die Abbildung 4 zeigt Heck und Front der Fahrzeuge als x_1 bzw. x_2 .

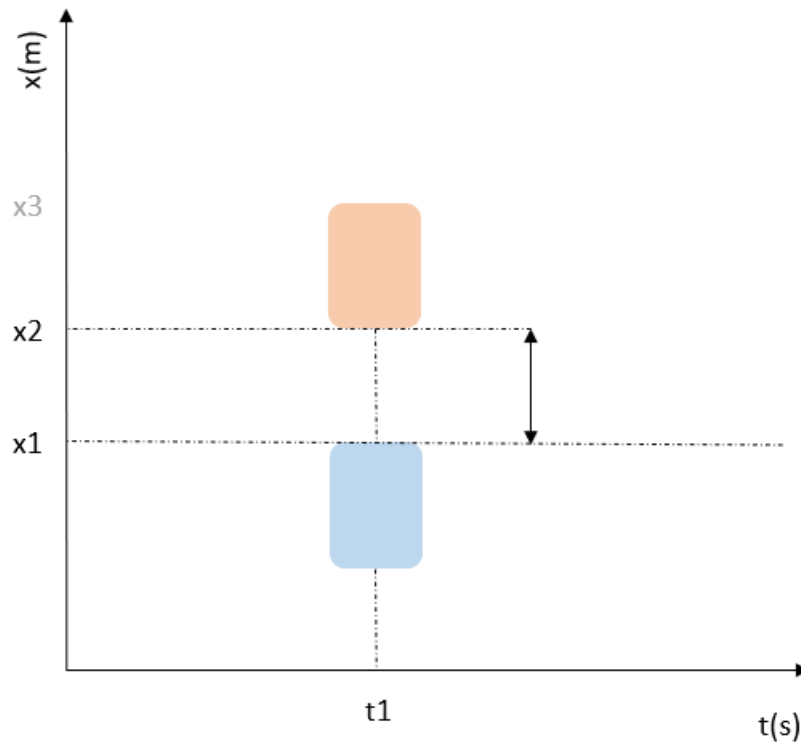


Abbildung 4: Lücke zwischen zwei Fahrzeugen (space gap).

b) Zeitlicher Abstand zwischen den Fahrzeugen

Um den zeitlichen Abstand zwischen zwei Fahrzeugen zu messen, wird ein Referenzpunkt des Raums x (im folgenden Beispiel x_1) gesetzt, der für beide Fahrzeuge gleich ist. So kann man die Intervehikelzeit und das Intervall messen (Dallmeyer, 2014):

- Die Intervehikelzeit beschreibt die Zeit, die zwischen dem Vorbeifahren des Vorder- oder Hintermanns zweier aufeinanderfolgender Fahrzeuge liegt (siehe Abbildung 5).

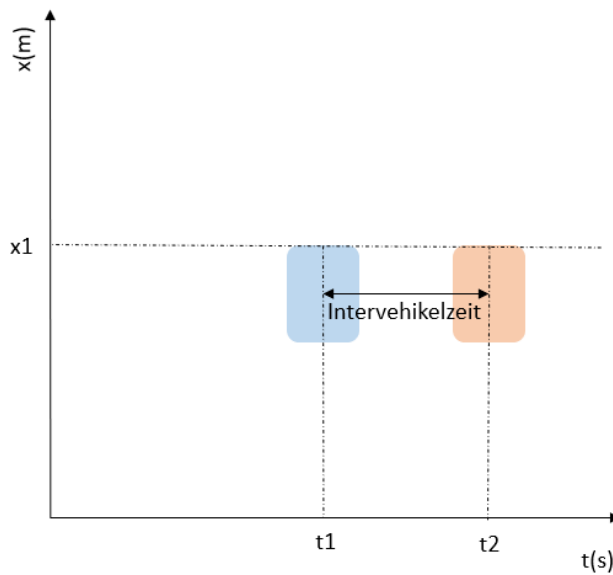


Abbildung 5: Intervehikelzeit von zwei Fahrzeugen in der gleichen Position.

- Das Intervall (auch „time gap“ genannt) ist die Zeit zwischen dem Vorbeifahren des Hecks eines Fahrzeugs und dem Vorbeifahren des Vorderteils des nächsten Fahrzeugs (siehe Abbildung 6).

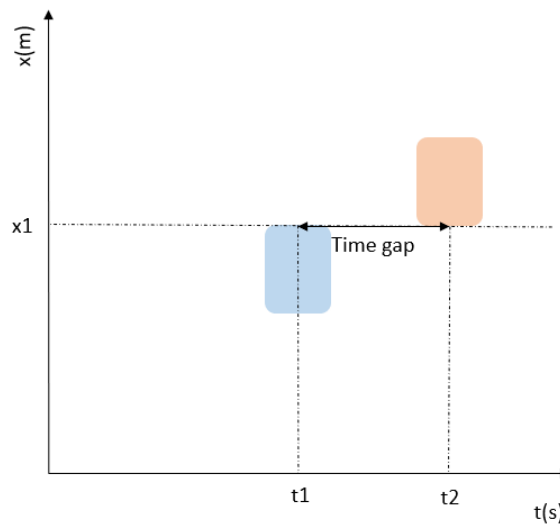


Abbildung 6: Time gap von zwei Fahrzeugen in der gleichen Position.

Im nächsten Teil werden die dynamischen Variablen und ihre Beziehungen definiert und erläutert. (Dallmeyer, 2014)

2.2 Fundamentaldiagramm

Um die Funktionsweise eines Straßenabschnitts oder eines Straßennetzes zu verstehen, besteht ein erster Ansatz oft darin, die Entwicklung der Geschwindigkeit des Verkehrs in Abhängigkeit vom Durchfluss zu messen („Durchfluss-Geschwindigkeits-Beziehung“ oder das ‚Fundamentaldiagramm‘) und daraus die Betriebsparameter des Abschnitts abzuleiten, wie z. B. die freie Geschwindigkeit oder die Kapazität. Dieser Abschnitt geht auf den Begriff des Fundamentaldiagramms ein, indem er seine mathematischen Ursprünge und Eigenschaften, seine Interpretation und seine Erstellung näher erläutert und eine Methode zur Schätzung seiner Parameter vorschlägt, die einfach zu implementieren ist.

2.2.1 Die Verkehrsvariablen

Verkehrsflussphänomene werden mit einem komplexen dynamischen Verhalten von Verkehrsmustern in Verbindung gebracht, die sich mit Raum und Zeit verändern. Daher wird der Begriff "raum-zeitlich" verwendet. Raum-zeitliche Merkmale des Verkehrs können nur gefunden werden, wenn die Verkehrsvariablen im tatsächlichen Verkehr in Raum und Zeit gemessen werden. Der Begriff ‚raum-zeitliches Verkehrsmodell‘ wird wie folgt definiert: Ein raum-zeitliches Verkehrsmodell ist eine Verteilung von Verkehrsflussvariablen in Raum und Zeit.

Die grundlegenden Verkehrsvariablen sind der Verkehrsfluss Q [Fahrzeuge/h], die Fahrzeugdichte K [Fahrzeuge/km] und die Fahrzeuggeschwindigkeit V [km/h] oder [m/s].

Der Begriff ‚Front eines Verkehrsmodells‘ wird wie folgt definiert: Die Front eines Verkehrsmodells ist ein beweglicher oder unbeweglicher Bereich, innerhalb dessen sich eine oder mehrere der Verkehrsvariablen räumlich (und zeitlich, wenn die Front beweglich ist) abrupt ändern. Es gibt eine stromabwärtige und eine stromaufwärtige Front eines Verkehrsmodells. Die Front des stromabwärts gelegenen Modells trennt das Modell von anderen stromabwärts gelegenen Verkehrsmodellen. Die Front des stromaufwärts gelegenen Modells trennt das Modell von anderen stromaufwärts gelegenen Verkehrsmodellen (Pilz, 2021).

Verkehrsvariablen und Verkehrsmodelle können erheblich von Verkehrsparametern abhängen. Verkehrsparameter sind Parameter, die Verkehrsvariablen und Verkehrsmodelle beeinflussen können. Verkehrsparameter sind beispielsweise die Infrastruktur des Straßennetzes (z. B. Arten von Engpässen an Kreuzungen und ihre Lage), Wetterbedingungen (trockenes oder regnerisches Wetter, Nebel, trockene oder nasse Straße, Glatteis, Schnee,

etc.), der Anteil an langen Fahrzeugen, die Tageszeit, Feiertage oder Fahrten zu Urlaubszwecken, Fahrzeugtechnologie sowie weitere verschiedenste Straßenbedingungen.

Ein Verkehrsfluss auf einem Straßennetz ähnelt stark der Bewegung einer Flüssigkeit. Die erste Ähnlichkeit betrifft die Definition des Netzes, das aus Rohren (Straßenabschnitten), Verbindungen (Kreuzungen), Abzweigungen, Austauschzonen, Kumulationsstellen usw. besteht. Die Ähnlichkeiten setzen sich in der Definition der Nachfrage fort, die das Netz durchströmt: Sie fließt von hinten nach vorne nach unten, je nachdem, in welche Richtung man den Verkehr lenken möchte. Und wenn sie durch das Netzwerk fließt, kommt es zu Überlastungen (Stau), wenn die Kapazität des Netzwerks nicht ausreicht, um das gesamte Nachfragevolumen abzuwickeln. Diese Überlastungen können lokal begrenzt bleiben oder den Gesamtbetrieb des Netzwerks stören. Diese Ähnlichkeiten führen dazu, dass zur Beschreibung von Straßenverkehrszuständen dieselben Variablen aus der Strömungsmechanik verwandt werden: Durchfluss, Geschwindigkeit und Dichte (auch als Konzentration bezeichnet). (Pilz, 2021)

Drei Werte sind für den weiteren Verlauf der durchgeführten Studie von zentraler Bedeutung: Verkehrsdichte, Verkehrsfluss und Geschwindigkeit.

2.2.2 Dichte des Verkehrs

Die Verkehrsdichte (oder -konzentration) D ist die Anzahl N der Fahrzeuge auf einem Abschnitt $[x, x + \Delta x]$ des Straßennetzes zu einem Zeitpunkt t (Formel 1). Ihre Einheit ist die Anzahl der Fahrzeuge pro Längeneinheit (z. B.: Kfz/km oder Kfz/m).

Formel 1: Verkehrsdichte

$$K = \frac{N}{\Delta x}$$

K: Verkehrsdichte.

N: die Anzahl der beobachteten Fahrzeuge.

Δx : beobachtete Distanz.

2.2.3 Verkehrsfluss

Auch Verkehrsstärke genannt, ist der Durchfluss, die Anzahl der Fahrzeuge, die einen Punkt x während eines Zeitintervalls Δt passieren. Seine Einheit ist die Anzahl der Fahrzeuge N pro Zeiteinheit (Beispiel Kfz/Std) (siehe Formel 2). (Kerner, 2009)

$$Q = \frac{N}{\Delta t}$$

Q: Verkehrsfluss.

N: die Anzahl der beobachteten Fahrzeuge.

Δt : Zeitintervall, währenddessen die Beobachtung durchgeführt wurde.

Die Ausgestaltung des Verkehrsflusses kann in drei Sorten eingeteilt werden: der freie Verkehr, ein sich bewegender breiter Stau und der synchronisierte Verkehr.

a) **Freier Verkehr**

Freier Verkehr ist zu beobachten, wenn die Fahrzeugdichte im Verkehr gering ist. Dabei sind die Wechselwirkungen zwischen den Fahrzeugen vernachlässigbar. Daher haben die Fahrzeuge die Möglichkeit, sich mit ihrer gewünschten und zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu bewegen. (Machemehl, 1997)

b) **Sich bewegender breiter Stau**

Die Phase des breiten Staus ist wie folgt definiert: Eine breite Stauphase ist ein beweglicher Stau, der die Durchschnittsgeschwindigkeit der stromabwärts gelegenen Front des Staus beibehält, während sich der Stau ausbreitet. Die Fahrzeuge können innerhalb der stromabwärts gelegenen Front des Staus beschleunigen und von einer niedrigen (oder keiner) Geschwindigkeit innerhalb des Staus zu einer höheren Geschwindigkeit stromabwärts des Staus wechseln. Ein breiter, sich bewegender Stau behält die Durchschnittsgeschwindigkeit der stromabwärts gelegenen Staufront bei, selbst wenn er sich durch andere, unterschiedliche Verkehrszustände ausbreitet. Daher wird die stromaufwärts gelegene Front am stärksten von dieser Phase beeinflusst, da Fahrzeuge auf eine sich noch bewegende Fahrzeugschlange aufschließen können, jedoch mit einer eher geringeren Geschwindigkeit als in dem Zustand des freien Verkehrs, in dem sich die Fahrzeuge von der stromaufwärts gelegenen Front befanden. (Elefteriadou, 2014)

c) **Synchronisierter Verkehr**

Die Phase des synchronisierten Verkehrsflusses ist wie folgt definiert: Im Gegensatz zur breiten Stauphase wird an der stromabwärtigen Front der synchronisierten Flussphase die Durchschnittsgeschwindigkeit der stromabwärtigen Front nicht mehr beibehalten. Insbesondere wird die Abwärtsflanke des synchronisierten Verkehrsflusses häufig an ei-

dem Engpass oder sogar an einem Totalausfall festgelegt. Die Verkehrsphase mit synchronisiertem Fluss weist nicht die Charakteristik der breiten Stauphase auf. Dies bedeutet konkret, dass der Verkehr überlastet ist und sich in einem Stauzustand befindet, der größer ist als der vorgesehene Raum und die vorgesehene Zeit. (Machemehl, 1997)

2.2.4 Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit wird in Einheiten von Entfernung pro Zeiteinheit gemessen, in der Regel in Kilometern pro Stunde (km/h). Dasselbe Maß wird verwendet, um die Bewegung eines einzelnen Fahrzeugs (mikroskopische Analyse) sowie die Bewegung des Verkehrsflusses (makroskopische Analyse) zu beschreiben. Es gibt zwei Möglichkeiten, Durchschnittsgeschwindigkeiten zu ermitteln. Der Beobachter kann die Momentangeschwindigkeiten an einem bestimmten Ort messen und den Durchschnitt dieser Momentangeschwindigkeiten an diesem Ort erhalten. In diesem Fall wird die Durchschnittsgeschwindigkeit wie folgt in Formel 3 geschätzt:

Formel 3: Geschwindigkeit

$$v_Z = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}$$

v_i sind die momentanen Geschwindigkeiten.

n ist die Gesamtzahl der Momentangeschwindigkeiten in der Stichprobe.

Mit dieser Methode, die auf den Momentangeschwindigkeiten beruht, erhält man die zeitlich gemittelte Geschwindigkeit an einem bestimmten Ort. Der Beobachter kann auch die Fahrzeit jedes Fahrzeugs zwischen zwei bestimmten Orten messen und die Geschwindigkeit jedes Fahrzeugs als Kehrwert der Fahrzeit erhalten. In diesem Fall wird die Durchschnittsgeschwindigkeit wie folgt in Formel 4 geschätzt:

Formel 4: durchschnittliche Geschwindigkeit

$$v_r = \frac{d}{\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n}}$$

d ist die Strecke, über die die Fahrzeiten gemessen wurden.

t_i sind die beobachteten Fahrzeiten.

n ist die Gesamtzahl der gemessenen Fahrzeiten.

Die Geschwindigkeit V steht für die Geschwindigkeit, mit der sich der Strom von Fahrzeugen bewegt. Diese Geschwindigkeit lässt sich aus dem Fluss und der Dichte wie folgend in Formel 5 berechnen:

Formel 5: Geschwindigkeit in Bezug auf Dichte und Fluss

$$V = \frac{Q}{K}$$

V: Geschwindigkeit.

Q: Verkehrsfluss.

K: Verkehrsdichte.

Dank dieser letzten Formel genügt es, zwei der Variablen zu kennen, um eine Schätzung der dritten zu erhalten. In der Regel ist es die Konzentration, die nicht bekannt ist, da sie bis auf wenige Ausnahmen nie direkt gemessen wird. Um trotzdem eine indirekte Schätzung der Konzentration zu erhalten, misst man klassischerweise die Belegungsquote. Sie stellt den Prozentsatz der Zeit dar, in der ein Punkt auf der Straße von einem Fahrzeug über ihm ‚besetzt‘ ist. Die Rate (Besetzungsgrad) wird in Prozent angegeben. Es ist zu beachten, dass seine Messqualität durch herkömmliche Sensoren stark beeinträchtigt wird, wenn die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge niedrig sind.

Die Variablen *Durchfluss*, *Geschwindigkeit* und *Dichte* sind also durch die Beziehung $Q = K \times V$ miteinander verbunden. Die (sog. fundamentale) Beziehung, die sie paarweise miteinander verbindet, bildet das Fundamentaldiagramm. (Elefteriadou, 2014) (Kerner, 2009)

2.2.5 Mathematische Eigenschaften und Merkmale

Ein Straßenabschnitt der Länge dx wird für einen kurzen Zeitraum dt beobachtet. Auf diesem Straßenabschnitt befinden sich Fahrzeuge, deren Nummer durch die Variable N beschrieben wird. Wenn davon ausgegangen wird, dass kein Fahrzeug spontan auf diesem Abschnitt erscheint oder verschwindet, dann lautet die Gleichung für die Erhaltung von Fahrzeugen wie in Formel 6 folgt:

Formel 6: Gleichung für die Erhaltung von Fahrzeugen

$$\frac{dk}{dt} + \frac{dq}{dx} = 0$$

Um gelöst zu werden, kann diese Gleichung in eine hyperbolische Gleichung nach der DichtevARIABLE K wie folgend in Formel 7 umgewandelt werden:

Formel 7: Hyperbolische Gleichung nach der DichtevARIABLE K

$$\frac{dk}{dt} + \frac{dQ(k)}{dx} = 0$$

Die Lösung dieser Gleichung setzt voraus, dass es eine Beziehung zwischen Durchfluss und Dichte wie folgend in Formel 8 gibt:

Formel 8: Beziehung Durchfluss und Dichte

$$q = Q(k)$$

Das Fundamentaldiagramm hat seinen Ursprung im Prinzip der Erhaltung von Fahrzeugen. Dieses hyperbolische System verleiht dem Fundamentaldiagramm die folgenden mathematischen Eigenschaften:

- Die Durchflusswerte sind positiv oder null.
- Das Fundamentaldiagramm ist über einen begrenzten Konzentrationsbereich kontinuierlich, der zwischen einer Konzentration von Null (wenn kein Fahrzeug vorhanden ist) und einer maximalen Konzentration (wenn alle Fahrzeuge in einer Warteschlange stehen) liegt. In diesem Konzentrationsbereich entspricht jeder Konzentrationswert einem einzelnen Durchflusswert.
- Das Fundamentaldiagramm ist konkav.

Die Nichteinhaltung dieser mathematischen Eigenschaften stellt die Existenz des Fundamentaldiagramms und die Solvenz des hyperbolischen Systems, das ihm zugrunde liegt, in Frage.

2.2.6 Die drei Darstellungen des Fundamentaldiagramms

Das Fundamentaldiagramm basiert auf der Beziehung zwischen den drei Variablen Q (Durchfluss), K (Dichte) und V (Geschwindigkeit). Folglich erfolgt die Darstellung der Beziehungen zwischen diesen Variablen in einem zweidimensionalen Diagramm auf drei möglichen Diagrammen, die die folgenden drei Beziehungen wie folgend in Formel 9 einhalten:

Formel 9: Fundamentaldiagramm zwischen Durchfluss, Dichte und Geschwindigkeit

$$V = F(K)$$

$$Q = F(K)$$

$$V = F(Q)$$

F : Eine kontinuierliche und lineare Funktion, die die oben genannten mathematischen Eigenschaften erfüllt.

Die Funktion F , die die Beziehungen zwischen Q , K und V darstellt, wird je nach Variablen und verwendeten Modellen unterschiedlich definiert. In der Tat gibt es verschiedene Theorien und Modelle, die seit den 1930er Jahren bis heute untersucht wurden, (Martin Treiber, 2010). Einige Modelle werden in Abschnitt 3 kurz vorgestellt.

Nachfolgend werden die drei Diagramme erläutert und graphisch dargestellt.

a) Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Diagramm (Q-K-Diagramm)

Im Fall der Beziehung zwischen Durchflussrate und Konzentration wird festgestellt, dass es zwei verschiedene Regime gibt (siehe Abbildung 7):

- Wenn die Dichte (oder Konzentration) gering ist, kann davon ausgegangen werden, dass der Durchfluss, der einen Punkt passiert, fast linear ansteigt. Wenn die Fahrzeuge nicht eingeschränkt sind, dann gilt: Je mehr Fahrzeuge sich in einem Bereich konstanter Länge vor einem bestimmten Punkt befinden (Dichte), desto mehr Fahrzeuge werden in den folgenden Minuten diesen Punkt passieren (Fluss). Dies gilt so lange, bis der Durchsatz die Kapazität des Weges erreicht hat. Zu diesem Zeitpunkt gibt es nämlich eine Einschränkung, die dem freien Fluss der Fahrzeuge entgegensteht.
- Ab einem bestimmten Punkt (der als kritischer Punkt bezeichnet wird) kommt es zu einer Überlastung; die Einschränkungen, denen der Verkehr ausgesetzt ist und die sich in einer Begrenzung des Durchsatzes widerspiegeln (weil es beispielsweise eine Begrenzung der Kapazität der nachfolgenden Fahrspur gibt), führen zu einem Anstieg der Konzentration. Jenseits des kritischen Punkts steigt also die Konzentration,

je weniger Durchfluss durch einen Punkt fließt. Diese beiden Regime spiegeln sich in den beiden Zonen in der folgenden Abbildung wider. Der grüne Bereich ist der Bereich mit fließendem Verkehr, der rote Bereich der Bereich mit Staus.

- Der kritische Punkt C , der den Beginn und/oder das Ende der beiden beschriebenen Phasen bestimmt, wird später erläutert, wenn die Kapazität definiert wird. Hier ist $C = Q_{max}, K_{opt}$.

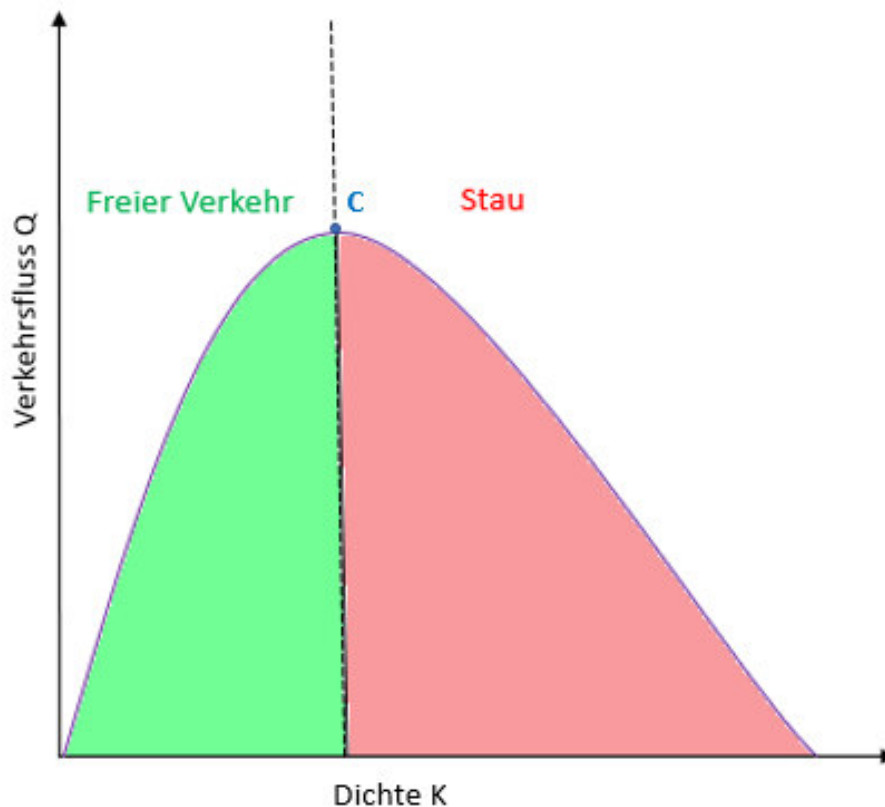


Abbildung 7: Q-K-Diagramm. (Elefteriadou, 2014)

b) Geschwindigkeit-Verkehrsfluss-Diagramm (V-Q-Diagramm)

Das grundlegende Geschwindigkeits-Kapazitäts-Diagramm (Abbildung 8) hat zwei wichtige Regionen. Die erste Region ist durch einen Verkehrsstau gekennzeichnet, in dem die Geschwindigkeit der Fahrspur mit der Kapazität zunimmt (roter Bereich). Die zweite Region wird als freier (oder flüssiger) Verkehr bezeichnet, in dem die Geschwindigkeit der Fahrspur steigt und die Kapazität sinkt (grüner Bereich). Hier ist $C = Q_{max}, V_{krit}$.

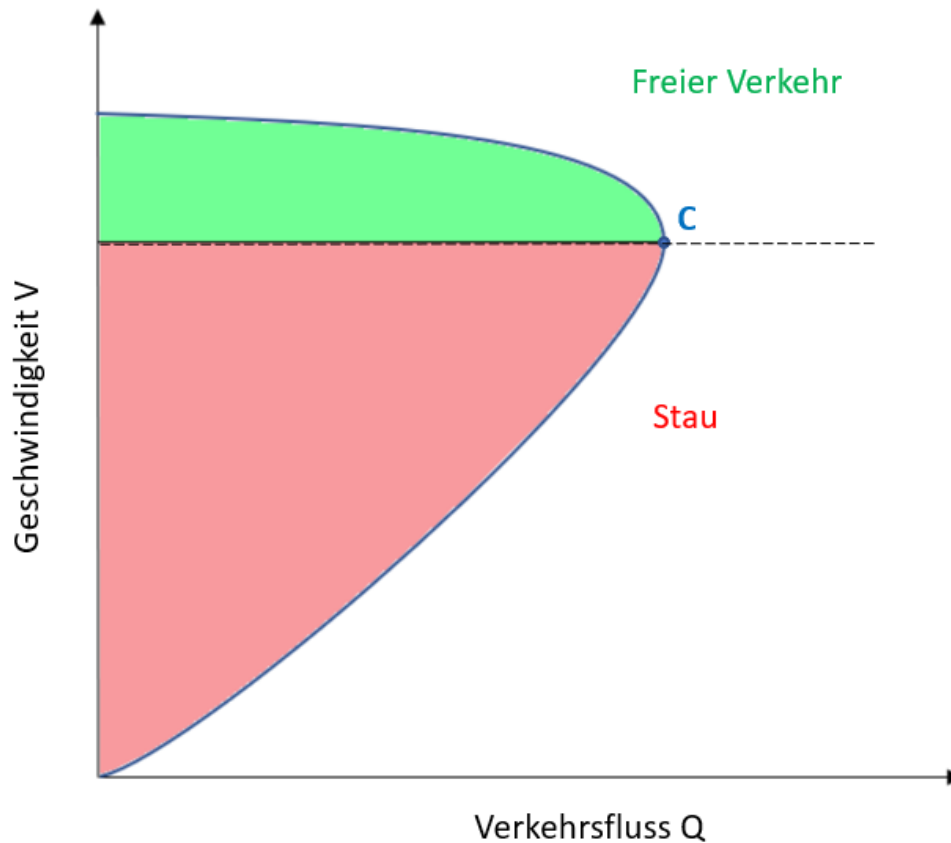


Abbildung 8: V-Q-Diagramm. (Elefteriadou, 2014)

c) Geschwindigkeit-Verkehrsdichte-Diagramm (V-K-Diagramm)

Das Verhältnis zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsdichte ist umgekehrt proportional. Je höher die Geschwindigkeit, desto geringer die Verkehrsdichte. Je höher die Verkehrsdichte, desto langsamer wird die Geschwindigkeit. Wie in den beiden vorherigen Diagrammen gibt es auch im V-K-Diagramm einen kritischen Punkt. Dieser kritische Punkt ist jedoch schwieriger zu bestimmen. Hier sind

Formel 10: Gleichung des kritischen Punktes

$$C = V_{krit} \cdot K_{opt}$$

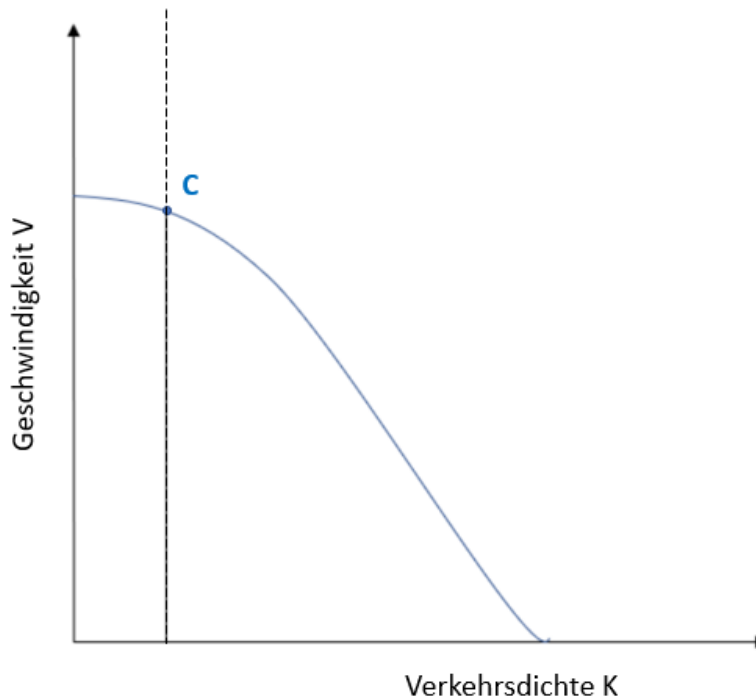


Abbildung 9: V-K-Diagramm. (Martin Treiber, 2010)

2.2.7 Kapazität

Die Kapazität stellt den maximal erreichbaren Durchfluss dar und wird angegeben als Q_{max} in [Kfz/h]. Wenn die Konzentration gering ist, fahren die Fahrzeuge mit ihrer Höchstgeschwindigkeit, die gleich der freien Fließgeschwindigkeit ist, und es ist zu beobachten, dass der Durchfluss durch einen Punkt fast linear ansteigt. Mit zunehmender Konzentration der Fahrzeuge in einem Bereich konstanter Länge oberhalb eines bestimmten Punktes steigt der Durchfluss. Dieser Anstieg setzt sich fort, bis der maximale Durchfluss erreicht ist, der die Kapazität des untersuchten Abschnitts bezeichnet. Dieser Punkt wird als kritischer Punkt K_{krit} bezeichnet. Wenn die Dichte weiter ansteigt, wird die Sättigung des untersuchten Straßenabschnitts erreicht. Diese Sättigung führt zu einer Verringerung des Durchsatzes und damit der Geschwindigkeit. Ab diesem Zeitpunkt handelt es sich nicht mehr um ein flüssiges Verkehrsregime. Jenseits dieses kritischen Punktes, wenn die Konzentration zunimmt, verringert sich der Durchfluss durch einen Punkt. Die maximale Dichte wird in dem Fall erreicht, in dem alle Fahrzeuge stillstehen. Dies bezeichnet die maximale Anzahl an stillstehenden Fahrzeugen, die eine Straße aufnehmen kann. (Kerner, 2009) (Elefteriadou, 2014)

Um die Kapazität einer Infrastruktur zu bestimmen, gibt es zwei Hauptmethoden:

Die erste Methode basiert auf der Beobachtung der maximalen Verkehrsströme, die unmittelbar vor dem Stau beobachtet wurden. In der überwiegenden Mehrheit der Fälle, in denen ein Stau an einer Schleife installiert wird, befindet sich der Staukopf stromabwärts der Schleife und nicht auf der Schleife selbst. Der Durchsatz, der in diesem Ring während eines Engpasses zu beobachten ist, entspricht daher der nachgelagerten Kapazität und keineswegs der Kapazität an dem Punkt, an dem der Ring platziert ist. Um einen Wert zu beobachten, der als nahe an der Kapazität angesehen werden kann, muss man sich also in den Zeitraum unmittelbar vor dem Engpass begeben und den Durchsatz messen. Dieser Wert kann, wenn er hoch ist, die Kapazität an dem Punkt sein, an dem sich der Loop befindet. Die Abbildung 10 zeigt den Zeitraum vor dem Auftreten eines Engpasses.

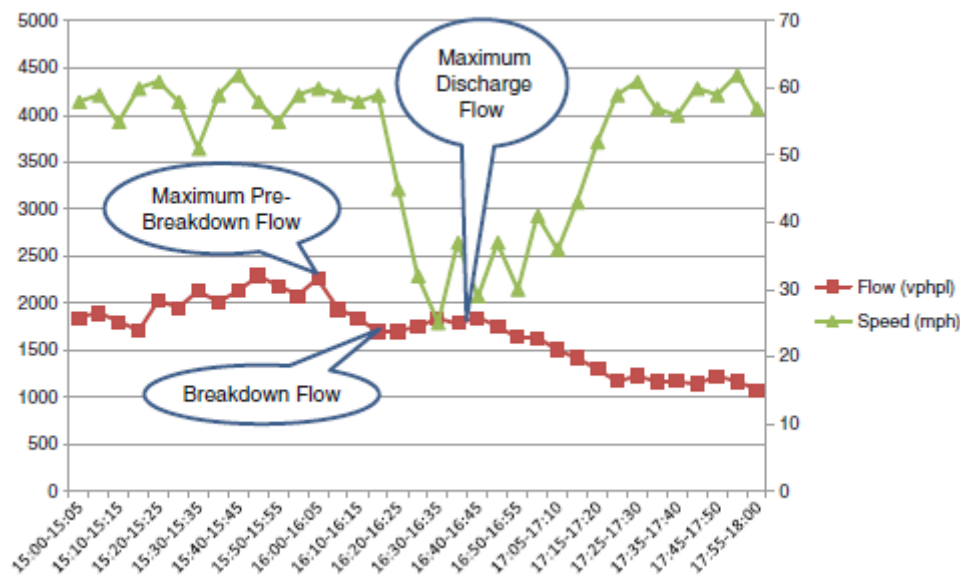


Abbildung 10: Erste Methode – Suche der Kapazität $C=Q_{max}$ (Kerner, 2009).

Die zweite Methode basiert auf der Anpassung einer Funktion durch eine Regression. Das Prinzip der Regression durch eine Exponentialfunktion ist, dass die Kurve die Punkte, die bei einem Stau beobachtet wurden, mit den Punkten verbindet, die bei einem Stau beobachtet wurden. Die, die im flüssigen Zustand beobachtet wurden, lassen die Kapazität erkennen, wie es in Abbildung 11 dargestellt ist.

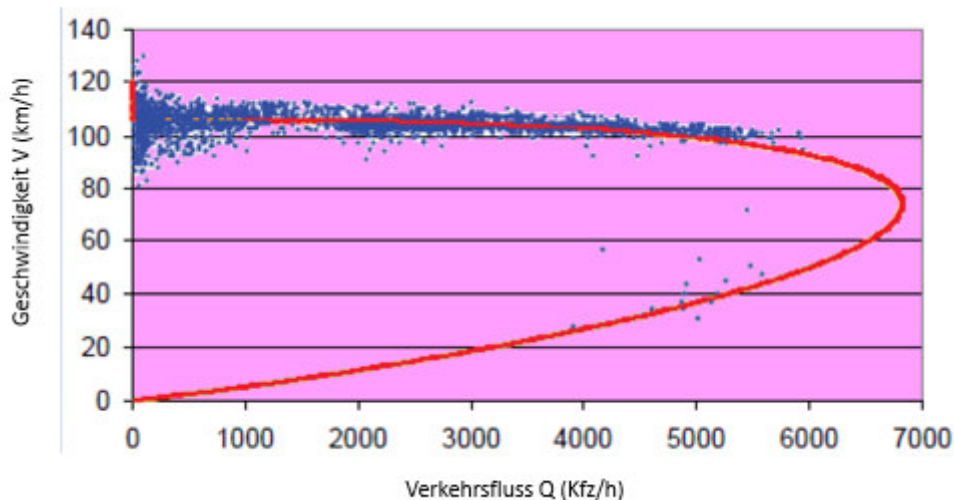


Abbildung 11: Zweite Methode – Suche der Kapazität $C=Q_{max}$. (Elefteriadou, 2014)

Im Gegensatz dazu ist es in der Regel sehr gut möglich, die Fließkapazität eines kritischen Punktes der Infrastruktur, der den Beginn des Staus darstellt, zu bestimmen. In vielen Fällen ist dies auch der einzige Wert, der operativ nützlich ist.

2.2.8 Stau, Nachfrage und Überlastung

In diesem Teil werden die Grundsätze der Überlastung (Stau), der Verkehrsnachfrage und des Verkehrsangebots und ihre Beziehungen zueinander sowie die Überlastung in größeren Maßstäben erläutert. Wie im vorherigen Unterabschnitt erläutert, führt die Betrachtung des Fundamentaldiagramms auf einem Streckenabschnitt zu einer einfachen Definition von Stau: Der Verkehr wird als Stau bezeichnet, wenn er sich im rechten Teil des Diagramms bewegt, d. h., wenn die Konzentration höher ist als die kritische Konzentration (Konzentration, die dem maximalen Durchsatz entspricht). Um den Begriff Stau und seine Eigenschaften zu erläutern, ist es notwendig, zwei weitere Begriffe zu definieren, nämlich Verkehrsnachfrage und Verkehrsangebot.

a) Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage stellt den Verkehr dar, der versucht zu fließen und der fließen würde, wenn er nicht eingeschränkt wäre. Dieser Begriff unterscheidet sich je nach Maßstab: Auf der Ebene eines Netzwerks bedeutet er die Gesamtnachfrage nach Fahrzeugen, die das Netzwerk nutzen möchten. Auf der Ebene eines bestimmten Punktes auf einer Spur beschreibt er die vorhandenen Fahrzeuge, die versuchen, sich zu bewegen. Beispielsweise entspricht die Nachfrage in einer Warteschlange, die an

einer roten Ampel entsteht, dem maximalen Durchsatz der Ampelstrecke, d. h. dem Durchsatz, der abfließen würde, wenn die Ampel auf Grün schalten würde.

b) Verkehrsangebot

Das Verkehrsangebot entspricht den Abflussmöglichkeiten der Infrastruktur; auch hier ist dieser Begriff maßstabsabhängig: Das Angebot eines Netzes stellt die Verkehrsströme dar, die insgesamt abfließen können, das lokale Angebot an einem Punkt stellt den Verkehrsstrom dar, der an diesem Punkt abfließen könnte. So ist das Angebot innerhalb einer Warteschlange, die an einer Ampel angehalten wird, gleich null, da jedes Fahrzeug von seinem Vordermann am Weiterfahren gehindert wird und der erste in der Schlange selbst von der roten Ampel angehalten wird. Innerhalb einer sich bewegenden Warteschlange ist das Angebot gleich dem Durchsatz am Stauende. Insgesamt entspricht das Angebot an jedem Punkt dem des am stärksten eingeschränkten Punkts stromabwärts.

Dies ermöglicht ein besseres Verständnis von Staus. In einer flüssigen Situation kann der gesamte Strom, der sich ergibt, abfließen und der Durchsatz entspricht der Nachfrage. Bei einem Stau hingegen ist es das Angebot, das den Durchsatz bestimmt. Ein Stau ist also eine Situation, in der die Nachfrage größer ist als das Angebot. Am Ende eines Staus (nach einem Zwischenfall oder zu Beginn der Grünphase) wird der Stau so lange bestehen bleiben, bis das neue Angebot (das größer ist als das Angebot, das die Straße während des Zwischenfalls oder der Rotphase hatte) lange genug anhält, um die Warteschlange vollständig zu entlasten. Man kann auch anmerken, dass die Interaktion zwischen Nachfrage und Angebot die Interaktion zwischen einer vorgelagerten Beanspruchung (der Nachfrage) und einer nachgelagerten Beschränkung (dem Angebot) ist. Das Auftreten eines Verkehrsstaus setzt zwangsläufig die Existenz eines Ortes der Belastung voraus, d. h. eines Punktes, an dem zumindest zeitweise die Nachfrage größer als das Angebot wird (Verkehrsspitze), bzw. das Angebot geringer als die Nachfrage wird (Störfall) (Helmut Nuhn, 2006).

2.2.9 Stau in Städten

Die oben beschriebene lokale Definition von Stau ist auch auf einem Netz von Kreuzungen gültig, hat aber kaum eine operationelle Bedeutung. Unmittelbar vor einer Ampelkreuzung beispielsweise sind je nach Farbe der Ampel schnelle Wechsel von Stau/Fluss zu beobachten, die keinen Hinweis darauf geben, ob die Bedingungen für den Verkehrsfluss mehr oder

weniger kritisch sind. In der Tat ist es der Begriff des Angebots, der hier seinen Sinn verliert, wenn die Zeitskala zu fein gewählt wird: Das Angebot spiegelt dann einfach die Farbe der Ampel wider. Die Wahl einer geeigneten Zeitskala gibt den verschiedenen Begriffen dieses Abschnittes ihren Sinn zurück. Wenn man den Einfluss von Ampeln einbezieht, indem man Angebot und Nachfrage z. B. für einen Ampelzyklus berechnet, kann man die bereits besprochene Definition von Stau beibehalten. Eine Einfahrt in eine Kreuzung gilt somit als überlastet, wenn die Nachfrage das Angebot übersteigt. (Maria Heide Zierer, 2010)

2.2.10 Kennzeichnung von lokalen Überlastungen im Dauerverkehr

Die verschiedenen Definitionen im vorherigen Absatz sind mögliche Arten, einen Stau zu charakterisieren, wobei nicht unbedingt alle operationell relevant sind. Darüber hinaus gibt es weitere Methoden zur Charakterisierung, deren Verbindung mit der genauen Definition nicht immer gewährleistet ist.

a) Durch die Verkehrsdichte

Die Charakterisierung von Staus, die sich am unmittelbarsten aus ihrer Definition ergibt, ist die Analyse der Konzentration. An einem Punkt, an dem Messungen von Durchsatz und Konzentration (oder Durchsatz und Besetzungsgrad) verfügbar sind, kann durch die Darstellung von Punktwolken von Durchsatz gegen Konzentration eine kritische Konzentration (oder ein kritischer Besetzungsgrad) bestimmt werden, bei deren Überschreitung der Verkehr überlastet ist.

b) Durch die Geschwindigkeit

Die zuvor gegebene Definition neigt dazu, jede Situation, in der die Geschwindigkeit unterhalb der kritischen Geschwindigkeit liegt, als Stau zu betrachten. Die Beobachtung von realen Daten, die Geschwindigkeit und Konzentration oder Geschwindigkeit und Durchsatz miteinander kreuzen, kann diese Sichtweise je nach Standort bestätigen oder widerlegen.

c) Durch Beobachtungen

Die Berechnung von Stauindikatoren beruht häufig auf der visuellen Beobachtung der Verkehrsbedingungen durch die Betreiber von Verkehrsmanagementzentralen. Darüber hinaus kommt es vor, dass die Betreiber eine Sicht aus hoch angebrachten Kameras, die eine räumlichere Sicht ermöglichen, mit einer Geschwindigkeitsmessung aus elektromagnetischen Schleifen konfrontieren. Diese beiden Sichtweisen

sind nicht immer miteinander vereinbar und können zu Missverständnissen und Unbestimmtheit führen.






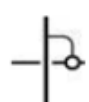




2.3 Dynamik des Verkehrs

Nachdem die Grundlagen sowie die Schlüsselvariablen des Verkehrs vorgestellt wurden, befasst sich dieser Teil mit dem Ort, der den Verkehr regelt, und der dynamischen Interaktion zwischen den zuvor vorgestellten Variablen. (Martin Treiber, 2010)

2.3.1 Knotenpunkte

Als Knotenpunkte werden bauliche Anlagen bezeichnet, die der Verbindung von zwei oder mehreren Straßen dienen. Wenn eine Straße an eine weitere, durchgehende Straße angebunden, so entsteht eine Einmündung, die auch als ‚dreiarmer Knotenpunkt‘ bezeichnet wird. Bei mehr als drei Knotenpunktarmen spricht man von einer Kreuzung: sie wird von mindestens zwei durchgehend befahrbaren Straßen gebildet. Die relevanteste Unterscheidung an Knotenpunkten wird durch die Führung der Verkehre in den (Teil-)Knotenpunkten markiert. Dabei werden Bereichen, in denen lediglich Ein- und Ausfädelvorgänge sowie Verflechtungen stattfinden, grundsätzlich von denen unterschieden, in denen auch kreuzende Verkehrsströme auftreten. Eine spezielle Knotenpunktform ist der Kreisverkehrsplatz, der gleichrangig drei oder mehr an einem Knotenpunkt zusammentreffende Straßen durch eine Kreisringfahrbahn verbindet. Die bauliche Grundform ergibt sich aus der Kombination der Verkehrsführung auf den zu verknüpfenden Straßen. Daher gibt es nicht nur reine planfreie bzw. plangleiche Knotenpunkte, sondern auch teilplanfreie und teilplangleiche. Für alle Grundformen gilt, dass in der Regel als übergeordnete Straße diejenige mit der größeren Verkehrsbedeutung gegenüber anderen Straßen definiert ist. Auf diesen Straßen fahren die Fahrzeuge in der Regel bevorrechtigt. Diese Bevorrechtigung ist im Knotenpunkt besonders hervorzuheben. Auf der untergeordneten Straße mit geringerer Verkehrsbedeutung sind die Fahrzeuge im Regelfall wartepflichtig. Durch die Kombination der baulichen Grundform mit der Betriebsform (Verkehrsregelung mit Verkehrszeichen bzw. mit Lichtsignalanlage) ergibt sich die Knotenpunktart. (Wolfgang Pietzsch, 2000). Die Tabelle 1 enthält eine Zusammenfassung der verschiedenen Möglichkeiten, die zuvor beschrieben wurden.

Tabelle 1: Darstellung der verschiedenen Arten von Knotenpunkten (Wolfgang Pietzsch, 2000).

Bauliche Grundform	Führung im Teilknotenpunkt/Knotenpunkt		Beispiele (übergeordnete Straße senkrecht dargestellt)
	übergeordnete Straße	untergeordnete Straße	
Planfreier Knotenpunkt	Einfädeln/Ausfädeln	Einfädeln/Ausfädeln	 
Teilplanfreier Knotenpunkt	Einfädeln/Ausfädeln	Einbiegen/Abbiegen Kreisverkehr	 
Teilplangleicher Knotenpunkt	Einbiegen/Abbiegen	Einbiegen/Abbiegen Kreisverkehr	 
Plangleicher Knotenpunkt			
Einmündung	Einbiegen/Abbiegen	Einbiegen/Abbiegen	
Kreuzung	Einbiegen/Abbiegen/ Kreuzen	Einbiegen/Abbiegen/ Kreuzen	
Kreisverkehr	Kreisverkehr		 

2.3.2 Kumulierte Abflüsse

Der kumulierte Durchsatz (oder die kumulierte Anzahl der Fahrzeuge) an einem Punkt ist gleich der Anzahl der Fahrzeuge, die diesen Punkt seit der Durchfahrt eines willkürlich als Referenz gewählten Fahrzeugs passiert haben.

Das bedeutet, dass die Untersuchung des kumulierten Durchflusses an mehreren Punkten voraussetzt, dass das gleiche Fahrzeug als Referenz verwendet wird, was eine operative

Schwierigkeit darstellt. Auf diesen Punkt wird später noch eingegangen. Die zeitliche Entwicklung t des kumulierten Durchflusses N an einem Punkt kann durch eine Kurve dargestellt werden (Abbildung 12).

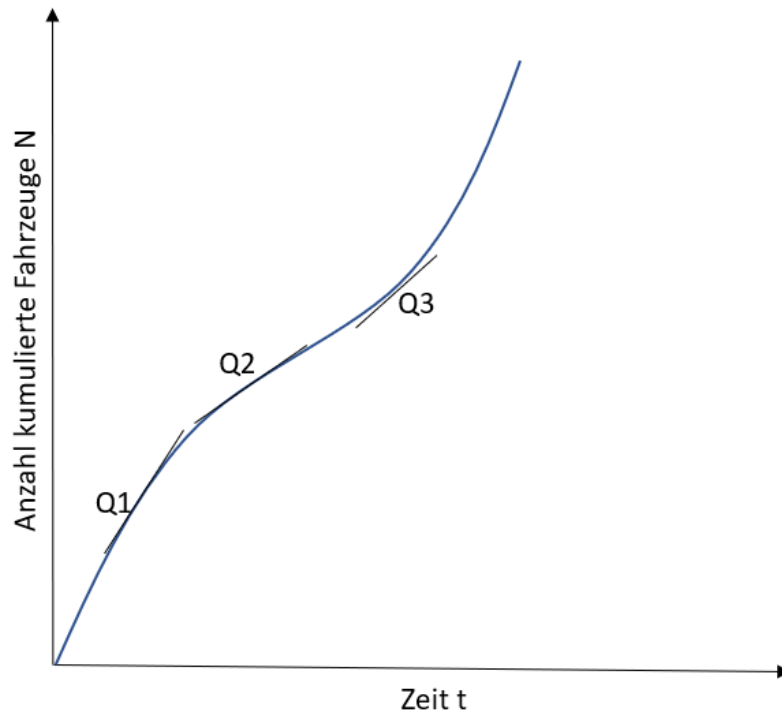


Abbildung 12: Entwicklung des kumulierten Durchflusses im Laufe der Zeit. (Dallmeyer, 2014)

Der Durchfluss ist zu jedem Zeitpunkt gleich der Steigung der Kurve für den kumulierten Durchfluss. Hier ist der Durchfluss zunächst hoch, bevor er abnimmt und dann wieder am Ende des Zeitraums ansteigt. (Holzapfel, 2020)

2.3.3 Fahrzeit

Die Fahrzeit ist die Zeit, die ein Fahrzeug benötigt, um von Punkt A nach Punkt B zu gelangen. Im Gegensatz zu den zuvor in Abschnitt 2.2.4 vorgestellten Momentanvariablen – seien sie individuell wie die Position oder kollektiv wie der Durchsatz oder die Konzentration – ist die Fahrzeit eine Größe, die für ein bestimmtes Fahrzeug keinen offensichtlichen Momentanwert hat. Tatsächlich ist die Fahrzeit ein Wert, der sich im Laufe der Zeit ‚aufbaut‘, denn solange ein Fahrzeug den Straßenabschnitt, auf dem es sich befindet, nicht verlassen hat, kennt man nicht die Fahrzeit, die es auf diesem Abschnitt zurückgelegt hat. Immer häufiger wird jedoch versucht, den Verkehrsteilnehmer bei der Einfahrt in einen Straßenabschnitt über die Fahrzeit zu informieren (entweder kollektiv durch Wechselverkehrszeichen oder

individuell durch fahrzeuginterne Geräte). Dies ist die angekündigte Fahrzeit. Die beiden Größen, realisierte Fahrzeit und angekündigte Fahrzeit, unterscheiden sich in der Realität signifikant, insbesondere wenn sich die Verkehrsbedingungen im Laufe der Zeit stark verändern. Die folgende Abbildung veranschaulicht den Unterschied zwischen der realisierten und der angekündigten Fahrzeit. Die dem Nutzer angekündigte Fahrzeit wird immer auf der Grundlage der Messungen berechnet, die zum Zeitpunkt der Einfahrt dieses Fahrzeugs in den Streckenabschnitt zur Verfügung stehen (Abbildung 13).

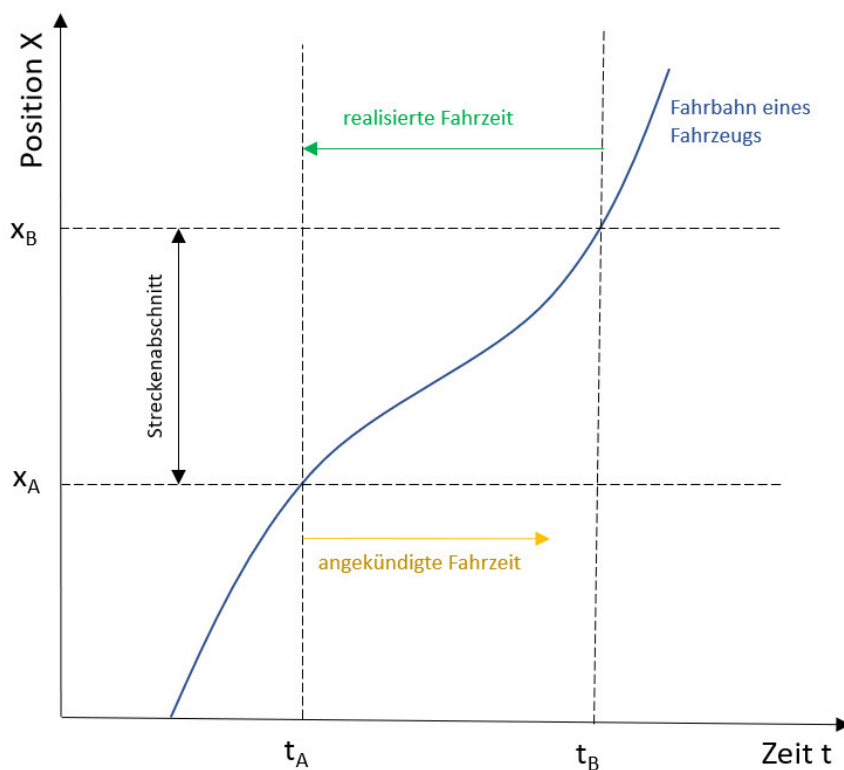


Abbildung 13: Angekündigte und realisierte Fahrzeiten eines Fahrzeugs.

In diesem Abschnitt wurden die Grundbegriffe des Straßenverkehrs wie Position, Zeit und Abstand vorgestellt. Danach folgte die Einführung der dynamischen Begriffe, die den Verkehr betreffen, wie Durchfluss, Dichte und Geschwindigkeit, und deren Beziehungen durch das Fundamentaldiagramm. Dann wurde die Umgebung beschrieben, in der all diese Variablen funktionieren. Schließlich wurde die Anwendung dieser verschiedenen Begriffe in der

[Analyse und Verbesserung des Straßenverkehrs an der Kreuzung Kalk Kapelle in Köln mithilfe des Simulationstools SUMO]

zuvor beschriebenen Umgebung beschrieben. Im nächsten Abschnitt werden die vorhandenen Modelle und möglichen Simulationen sowie die Software, die potenziell verwendet werden könnte, vorgestellt.

3. Verkehrssimulation

Nach der Vorstellung und Definition der Grundlagen werden in diesem Abschnitt die Verkehrsmodelle vorgestellt, die im Laufe der vergangenen Jahre entwickelt wurden. Anschließend werden die Werkzeuge zur Steuerung der vorgestellten Modelle vorgestellt. Danach wird der Begriff der Simulation eingeführt, der eine theoretische Anwendung der verschiedenen Modelle und der möglichen Hebel zur Änderung und zum Testen der verschiedenen Szenarien ermöglicht. Schließlich werden die verschiedenen Softwarepakete vorgestellt, mit denen Simulationen durchgeführt werden können, und es wird die Software ausgewählt, die am besten zur Anwendung dieser Arbeit passt: die Simulationssoftware SUMO.

3.1 Modelle der Verkehrssimulation

Ein Straßennetz ist so konzipiert, dass seine Nutzer von einem Ort zum anderen gelangen können. In diesem Zusammenhang besteht es aus einer Reihe von Straßen mit mehr oder weniger Fahrspuren. Die Knotenpunkte zwischen Straßen, da sie in städtischen Gebieten aufgrund ihrer Konzentration unvermeidlich sind, ermöglichen die Steuerung der kollidierenden Fahrzeugströme. Das sorgt für deren Sicherheit, vermeidet Interblockaden und gibt Autofahrern die Möglichkeit, ihre Route zu wechseln. Diese Kreuzungen oder in einigen Fällen auch Kreisverkehre, regeln den Verkehr und wenden in der Regel Rechts-vor-Links-Regeln an oder sind mit Ampeln ausgestattet, um besonders gefährliche Situationen zu bewältigen.

Das städtische Straßennetz kann daher als eine Ansammlung von Knotenpunkten betrachtet werden, die durch Straßen miteinander verbunden sind, zu denen noch zusätzliche operative Elemente (Schilder, Ampeln usw.) hinzukommen.

In einem Netz mit mehreren Knotenpunkten werden die Achsen in der Regel als Haupt- oder Nebenstraßen unterteilt, je nach Nutzung und Kapazität. Ein Beispiel für ein Netz von Kreuzungen ist in Abbildung 14 dargestellt. Die zentrale Kreuzung liegt auf zwei Achsen (Arterien). Die Zahlen geben die Anzahl der Sprünge an, die diese Kreuzung von den anderen Kreuzungen trennen. So wird eine gerade Linie, die aus mehreren aufeinanderfolgenden Kreuzungen besteht und den Großteil des verfügbaren Verkehrs aufnimmt, als Hauptschlagader bezeichnet, während die anderen Straßen, die auf jeder der Kreuzungen zugänglich sind, als Nebenstraßen bezeichnet werden. Diese Unterscheidung ist nützlich für

die Koordinierung von Ampeln, die in den meisten traditionellen Systemen auf Hauptverkehrsadern erfolgen. Sie ist auch nützlich für das Verständnis der Entstehung von Staus, die dazu neigen, sich dort zu bilden, wo der Verkehr am stärksten ist.

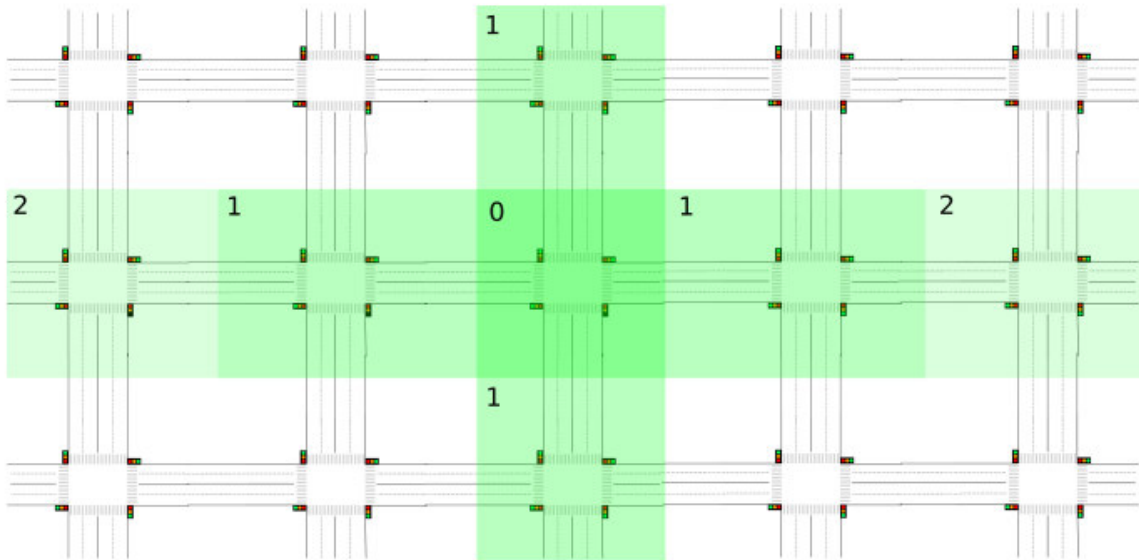


Abbildung 14: Darstellung von einem Netz mit mehreren Knotenpunkten. (Holzapfel, 2020)

Den bestehenden Straßenverkehr auf einem solchen Netzwerk zu beschreiben, ist von entscheidender Bedeutung. Diese Art der Untersuchung ermöglicht nicht nur die Planung von Veränderungen im Straßennetz (z. B. Bauarbeiten), sondern heutzutage auch die Durchführung von numerischen Simulationen, mit denen sich Schwierigkeiten wie z. B. Staus oder Unfälle vorhersagen lassen.

Die Verkehrssimulation findet bei Verkehrsforschern immer mehr Beachtung. Viele Probleme, wie z. B. die Verwaltung von Staus und Kreuzungsprioritäten, können aufgrund ihrer Komplexität nicht mit herkömmlichen Analysewerkzeugen gelöst werden. Verkehrssimulatoren ermöglichen die Untersuchung des gesamten Straßensystems und die Bewertung verschiedener Verkehrsmanagementalternativen, um optimale Lösungen für verschiedene Szenarien, die im Verkehr auftreten können, zu ermitteln. Im Allgemeinen gibt es drei Hauptansätze zur Beschreibung und Bewertung von Verkehrsphänomenen: makroskopisch, mikroskopisch und mesoskopisch. (Martin Treiber, 2010)

3.1.1 Mikroskopische Modelle

Mikroskopische Modelle können das individuelle Verhalten jedes einzelnen Fahrzeugs und Fahrers auf dem Straßennetz beschreiben. In der Regel müssen viele Parameter berücksichtigt werden, aber sie ermöglichen realistische numerische Simulationen. In diesen Modellen wird das Verhalten eines Fahrzeugs individuell von seinen Nachbarn wahrgenommen. Die statistische Physik ermöglicht es, das Verhalten von physikalischen Systemen mit einer großen Anzahl von Teilchen zu untersuchen. Es ist also möglich, ein makroskopisches System anhand der Merkmale seiner Elemente, die mikroskopisch sind, zu beschreiben. Der Vergleich mit dem städtischen Straßenverkehr liegt auf der Hand: Fahrzeuge sind die beweglichen Elemente und damit die Teilchen des Systems.

Die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen werden durch die Art und Weise bestimmt, wie sich die Fahrzeuge gegenseitig in ihrer Bewegung beeinflussen. Eines der Modelle, die diesem Prinzip folgen und für mikroskopische Modelle repräsentativ sind, ist das Fahrzeugverfolgungsmodell, das das Verhalten eines Fahrzeugs beschreibt, das einem anderen folgt.

Zelluläre Automatenmodelle sind in jüngerer Zeit entstanden und eignen sich auch für die mikroskopische Verkehrsmodellierung. Sie bestehen aus einem regelmäßigen Gitter von Zellen, von denen jede einen Zustand haben kann, der aus einer endlichen Menge ausgewählt wird und der sich im Laufe der Zeit entwickeln kann. Der Zustand einer Zelle zu einem bestimmten Zeitpunkt ist eine Funktion des Zustands einer endlichen Anzahl von Nachbarzellen zum vorherigen Zeitpunkt. In jeder Zeiteinheit werden die Regeln auf jede Zelle des Gitters angewandt, wodurch neue Generationen von Zellen entstehen, die direkt von der vorherigen Generation abstammen. Um die Entwicklung des Verkehrs auf einer Autobahn darzustellen, kann ein auf zelluläre Automaten basierendes Modell verwendet werden. Jede Zelle steht für einen Teil der Autobahn, der von einem Fahrzeug mit variabler Geschwindigkeit befahren werden kann oder nicht. Jedes Fahrzeug rückt also bei jedem Zustandswechsel um eine Strecke vor, die proportional zu seiner Geschwindigkeit ist. Andere Modelle berücksichtigen die Reaktionszeit der Fahrer und machen die Zustände metastabil. Diese Reaktionszeiten werden integriert, indem eine Bremswahrscheinlichkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig gemacht wird. Bei einigen Modellen können die Fahrzeuge die Geschwindigkeit der vor ihnen fahrenden Fahrzeuge voraussehen. Man beachte, dass zel-

luläre Automaten auch für verkehrsbezogene Anwendungen nützlich sind, z. B. für das Ampelmanagement, wo eine Zelle einer Kreuzung gewidmet werden kann, die mit ihren Nachbarn koordiniert wird.

In mikroskopischen Modellen werden alle Fahrzeuge individualisiert und es wird versucht, das Verhalten jedes einzelnen Fahrzeug-Fahrer-Paares nachzubilden. Diese Art von Modellen hat das Ziel, das tatsächliche Verhalten der Fahrzeuge so nahe wie möglich zu beschreiben. Um dies zu erreichen, versuchen diese Modelle nachzubilden, wie ein Fahrzeug auf seine Umgebung reagiert, also auf die Infrastruktur, auf der es fährt, und die anderen Fahrzeuge um herum. Diese mikroskopischen Modelle basieren auf einer vereinfachten Analyse der Fahraufgabe.

Aus den verschiedenen durchgeführten Beobachtungen geht hervor, dass die Fahrer folgendes Verhalten an den Tag legen: Sie entnehmen Informationen aus ihrer Umgebung (Position der umliegenden Fahrzeuge, Anzeigen der Zähler auf dem Armaturenbrett, Vibrationen des Fahrzeugs, etc.), verarbeiten diese Informationen, treffen eine Entscheidung und handeln, indem sie ein Bedienelement des Fahrzeugs betätigen. Da die Handlungsmöglichkeiten des Fahrers auf die Kontrolle der Fahrzeugbeschleunigung (Bremsen oder Beschleunigen) und die Kontrolle der Lenkung (Spur halten oder Spur zu wechseln) beschränkt sind, kann die Fahraufgabe in Teilaufgaben zerlegt werden, die die Kontrolle der Beschleunigung und die Kontrolle der Lenkung sind. Verkehrsmodelle beschäftigen sich mehr mit der Aufgabe der Beschleunigungssteuerung als mit der Aufgabe der Lenksteuerung. So wird in den Modellen für nachfahrende Autos davon ausgegangen, dass ein Fahrer seine Beschleunigung an die Fahrzeuge vor ihm anpasst. Der Einfluss der Lenksteuerung wird bei der Untersuchung der Strömung vernachlässigt. Er kommt erst bei der Beschreibung von Spurwechseln zum Tragen, die in anderen Modellen als den Modellen des Nachläuferautos beschrieben werden. So bestehen mikroskopische Modelle oft aus mehreren Modellen, die jeweils eine Teilaufgabe des Fahrens beschreiben. Klassischerweise werden ein Schleppwagenmodell und ein Spurwechselmodell kombiniert, um den mehrspurigen Fluss von Fahrzeugen zu beschreiben. (Dallmeyer, 2014)

Im mikroskopischen Ansatz werden zwei Arten von Modellen betrachtet: das Längsmodell und das Seitenmodell:

Das mikroskopische Längsmodell wird verwendet, um die Bewegung des Fahrzeugs allein zu beschreiben oder um sein Verfolgungsverhalten gegenüber einem anderen Fahrzeug darzustellen. In diesem Stadium lassen sich diese Modelle in zwei Typen unterteilen: das Fahrermodell und das Modell für automatisierte oder halbautomatisierte Fahrzeuge.

a) Fahrermodell

Das Fahrermodell ist aufgrund der großen Anzahl von Parametern eine sehr komplexe Aufgabe. Ein so genanntes ‚vollständiges‘ Fahrermodell muss mehrere Parameter berücksichtigen, die zum einen mit seinem Verhalten im Fahrzeug und zum anderen mit seiner Reaktion auf die ihn umgebende Umwelt zusammenhängen. In der Literatur gibt es mehrere Modelle, die sich mit diesem Thema befassen. Um diese Arbeit übersichtlich zu halten, werden die Modelle nicht vorgestellt. Um das richtige Modell für eine bestimmte Situation auswählen zu können, werden die wichtigsten Parameter, die in diesen Modellen untersucht werden, hier genannt: die zeitliche Vorwegnahme, die räumliche Vorwegnahme, der Fehler bei der Schätzung des Abstands und der Relativgeschwindigkeit, die Einhaltung der tatsächlichen Grenzwerte für die Beschleunigung und Verzögerung eines Fahrzeugs und die Einhaltung der Grenzwerte für die Geschwindigkeit der kinematischen Welle.

b) Automatisierte/Halbautomatisierte Fahrzeuge

Ein autonomes Fahrzeug, automatisiertes Fahrzeug, Fahrzeug mit Fahrerdelegation oder vollautomatisches Fahrzeug ist ein Kraftfahrzeug, das auf offener Straße ohne Eingreifen eines Fahrers fahren kann. Mit dem Ziel, das Längsverhalten eines automatisierten Fahrzeugs darzustellen, werden aufgrund der Vielfalt der von den verschiedenen Automobilherstellern verwendeten Modelle und ihrer Synthesetechniken und wie beim Fahrermodell die wichtigsten Parameter ausgewählt, um das geeignete literarische Modell für die Anwendung in einer bestimmten Situation zu wählen: Die Einfachheit seiner Implementierung im Hinblick auf die Komplexität der Programmierung und die benötigte Rechenzeit; und die Verfügbarkeit und Benutzerfreundlichkeit seiner Parameter. Ein Modell mit physikalisch repräsentativen Parametern (Beschleunigung und Verzögerung, Abstand oder Zeit vor dem Ziel) ermöglicht es, die Phänomene und Probleme im Verkehr besser zu untersuchen und zu verstehen.

3.1.1.2 Mikroskopisches Seitenmodell

Das mikroskopische Seitenmodell wird verwendet, um den Spurwechsel von Fahrzeugen in einem zwei- oder mehrspurigen Verkehr zu steuern. Dieses Modell integriert in der Regel zwei Schritte: Entscheidungsfindung und Spurwechselaktion. In der Literatur gibt es zwei Ansätze für die Spurwechselaktion. Der erste besteht darin, dass zwischen den Spuren gesprungen wird. In diesem Fall erfolgt der Spurwechsel auf diskrete Weise. Beim zweiten Ansatz folgt das Fahrzeug beim Spurwechsel einem bestimmten Pfad, der z. B. durch einen Spline definiert ist. In diesem Fall erfolgt der Spurwechsel auf kontinuierliche Weise. Diese Art des Spurwechsels gibt es in den meisten Verkehrssimulatoren.

Hinweis: Im Abschnitt 2 wurden die Grundbegriffe *Position*, *Zeit*, *Fahrzeugabstand* und *Momentangeschwindigkeit* vorgestellt und erklärt, die als Parameter bei der Modellierung auf mikroskopischer Ebene verwendet werden. (Holzapfel, 2020)

3.1.2 Makroskopische Modelle

Makroskopische Modelle dienen der analytischen Theorie und ermöglichen es, das Verhalten von Fahrzeugströmen zu beschreiben, ohne zwischen einzelnen Fahrzeugen zu unterscheiden. Der Verkehr wird somit in aggregierter Form dargestellt. Diese Modelle betrachten den Verkehr als ein kontinuierliches Phänomen. Sie werden in der Regel aus der Strömungsmechanik, insbesondere der Fluidodynamik (d. h. Flüssigkeiten in Bewegung), abgeleitet. Ein besonders anschauliches Beispiel ist homogene Autobahnen, bei denen nicht nach Fahrzeugen unterschieden wird. Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist der Fall von Kreisverkehren, wobei Verkehrsströme z. B. als gegensätzliche Fluide beschrieben werden. Die festgestellte Erkenntnis ist, dass im Allgemeinen der größere Strom die Oberhand, und damit die Priorität über den kleineren Strom gewinnt. Diese Modelle werden jedoch eher für Verkehrsdichte- und Kapazitätsstudien verwendet. Die makroskopische Modellierung des Verkehrs ermöglicht es, sein Gesamtverhalten mithilfe der drei in Abschnitt 2 vorgestellten Parametern *Geschwindigkeit*, *Verkehrsfluss* und *Verkehrsdichte* zu charakterisieren. (Elefteriadou, 2014)

3.1.3 Mesoskopische Modelle

Mesoskopische Modelle beschäftigen sich nicht mit einzelnen Fahrzeugen, sondern eher mit Gruppen von Fahrzeugen, deren Interaktionen auf einer niedrigen Detailebene beschrie-

ben werden. Damit veranschaulichen sie den Verkehr auf einer Ebene zwischen mikroskopischen und makroskopischen Modellen. Die Fahrzeuggruppen haben in mesoskopischen Modellen dieselben Eigenschaften, z. B. denselben Ursprung, dasselbe Ziel, dieselbe gewünschte Geschwindigkeit, etc. Es gibt drei Arten von mesoskopischen Modellen: Modelle zur Verteilung zwischen Fahrzeugen, Gruppenmodelle (Cluster) und einige mesoskopische Modelle, die auf der Theorie der Gaskinetik beruhen (Kerner, 2009).

3.1.4 Modellierung und Simulation

Es wird zwischen *Modellierung* und *Simulation* unterschieden. Die Modellierung zielt darauf ab, ein Modell zu entwerfen, mit dem die physikalische Realität eines bestimmten Phänomens oder Systems, das zu komplex ist, um es direkt zu erfassen, besser verstanden werden kann. So drückt die Modellierung häufig auf mathematische Weise die Funktionsweise eines zeitlich kontinuierlichen Systems aus, während sie gleichzeitig das Verständnis und die analytische Vereinfachung dieses Systems anstrebt. Der Zweck eines Modells ist es, in einem Simulationswerkzeug numerisch getestet zu werden.

Die Simulation wiederum stützt sich auf die Produkte der Modellierung, um die Auswirkungen einer Aktion auf dieses System untersuchen zu können. Die Simulation versucht, die Dynamik komplexer Systeme zu beschreiben und verschiedene Szenarien zu testen. Diese Experimente werden mithilfe von Computern durchgeführt. Ein Simulationswerkzeug kann also schematisch auf die Programmierung eines bestimmten Modells am Computer reduziert werden. In den letzten Jahren hat sich die Computertechnik weiterentwickelt, insbesondere die Rechenleistung und -geschwindigkeit der heutigen Mikroprozessoren und die Datenspeicherkapazität der Computer. Diese Entwicklungen ermöglichen es, Anwendungen in nahezu Echtzeit in Betracht zu ziehen. Diese Rechengeschwindigkeit ermöglicht es außerdem, in Simulationen eine große Bandbreite an Konfigurationen zu testen. Im Straßenverkehr können verschiedene Strategien zur Verkehrsregelung getestet werden (Überholmanöver, Geschwindigkeitsbegrenzungen, Steuerung von Ampelkreuzungen).

Da ein Modell ein Abbild der Realität ist, um ein komplexes Phänomen besser zu verstehen, beruht es notwendigerweise auf vereinfachenden Annahmen. Oft ist es notwendig, sich auf die ursprünglichen Annahmen des Modells zu beziehen, um zu wissen, ob ein Anwendungsfall dem Gültigkeitsbereich des Modells entspricht.

Die Verkehrsmodellierung im weiteren Sinne umfasst zwei unterschiedliche, aber nicht unabhängige Ansatzstrategien. In unserem Fall eignet sich der Verkehr schlecht für die Theoretisierung, da er sowohl zu komplex ist, um eine elementbasierte Beschreibung zu ermöglichen, als auch nicht ausreichend komplex ist, um eine elementbasierte Beschreibung zu ermöglichen, aber auch nicht ausreichend komplex ist, um die in der Physik üblichen ‚Grenzüberschreitungen‘ zu ermöglichen. Die erste steht im Zusammenhang mit der Untersuchung des Zuneigungsprozesses von Nutzern in einem bestimmten Netzwerk. Die Zuweisung ist definiert als die Art und Weise, wie sich eine bekannte Menge von Menschen auf eine Reihe von Wegen verteilt, die ein charakteristisches Infrastrukturnetz bilden. Im zweiten Zweig geht es darum, den Fluss von Fahrzeugen auf einem festgelegten Weg genauer zu beschreiben. Dieser Zweig ergänzt den ersten insofern, als er die Ergebnisse dieser Zuordnung nutzt. In diesem Fall geht es darum, das Verhalten der Verkehrsteilnehmer beim Verfolgen oder auch die Phänomene des Einfädels und des Spurwechsels zu verstehen. Die Untersuchung des Verkehrsflusses zielt auch darauf ab, Staus zu beschreiben und zu erklären. (Elefteriadou, 2014) (Kerner, 2009) (Moltenbrey, 2020)

3.2 Verkehrssimulation

3.2.1 Mögliche Tools zur Beeinflussung des Straßenverkehrs

3.2.1.1 Lichtzeichenanlage (LZA)

Die Nützlichkeit des Ampelsystems für die Verkehrssicherheit liegt auf der Hand, aber um das Auftreten von Nebenproblemen zu vermeiden, ist eine sorgfältige Untersuchung verschiedener Details erforderlich. Dazu gehört z. B. die zeitliche Abstimmung der verschiedenen Fahr- und Haltephasen, um die Bildung von kontraproduktiven Warteschlangen zu vermeiden. Jüngste Studien haben beispielsweise gezeigt, dass es für bestimmte Straßenkreuzungen besser ist, einen Kreisverkehr zu bauen (wenn genügend Platz vorhanden ist), als eine Ampelanlage zu installieren, so dass viele Ampelanlagen jetzt durch Kreisverkehre ersetzt werden. (Justiz, kein Datum)

Mit dem Aufkommen neuerer Technologien und der Informationstechnologie wurden automatisierte Ampelsteuerungen eingeführt, die auch dem öffentlichen Verkehr dienen, um den Transit von Landfahrzeugen zu erleichtern; der Bus, die Straßenbahn oder das Einsatzfahr-

zeug, falls vorhanden, hat ein Gerät an Bord, etwa ein Funkgerät, das sich mit dem Ampelsystem verbinden kann, um einen Vorrang zu beantragen. (Holzapfel, 2020) In den fortschrittlichsten Versionen wird der Betrieb moderner Ampelanlagen durch Sensoren gesteuert. Diese sind Magnetspulen, die durch in den Asphalt eingelassene elektrische Kabel gebildet werden und in der Lage sind, die Zeitsteuerung der Ampel und die Verkehrsströme dank einer speziellen Software in Echtzeit zu steuern. Auch können Ampeln mit Kameras ausgestattet werden, die ein Auto aufzeichnen, das bei Rot über die Kreuzung gefahren ist, und es zum Anhalten auffordern, so dass der Fahrer anhand des Kennzeichens ermittelt und gegebenenfalls eine Strafe verhängt werden kann.

Weniger moderne, aber immer noch wirksame Methoden zur Verbesserung des Verkehrsmanagements sind die Installation einer speziellen Taste an Fußgängerübergängen, so dass der Fahrzeugstrom bei Bedarf unterbrochen werden kann.

Außerdem ist es üblich (vor allem an kleineren Kreuzungen), nachts die Ampeln von der normalen rot-gelb-grünen Abfolge auf das permanent gelbe Blinklicht mit der entsprechenden Vorfahrtsregelung umzustellen, um unnötige Wartezeiten zu vermeiden und eventuelle Streitigkeiten im Zusammenhang mit Verkehrsunfällen leichter zu schlichten. Zu dieser Tageszeit wäre es nämlich schwierig, Zeugen zu finden, die feststellen könnten, welcher der beiden Fahrer tatsächlich über die rote und welcher über die grüne Ampel gefahren ist.

Obwohl die Hauptfunktion der Ampeln nach wie vor die Regelung des Kreuzungsverkehrs ist, werden in den letzten Jahren immer häufiger Ampeln als Geschwindigkeitsregler auf Straßen eingesetzt, die nicht unbedingt eine Kreuzung haben: Diese Ampeln werden als Geschwindigkeitsampeln (oder Verkehrsampeln) bezeichnet, und ihre Funktionsweise ist anders: Die Konvention der Farben bleibt dieselbe, wobei die Funktionsweise anders ist. Während sich die Farben normalerweise per Zeitschaltung ändern, drehen sie sich hier nach der Geschwindigkeit der herannahenden Autos. Eine Kamera erfasst die Geschwindigkeit und die Ampel bleibt immer grün, aber wenn die entgegenkommenden Fahrzeuge die Geschwindigkeitsbegrenzung überschreiten, schaltet die Ampel schnell erst auf gelb und dann auf Rot, um dann nach einigen Sekunden wieder auf grün zu schalten.

Tabelle 2: Nachteile und Vorteile der LZA. (Dallmeyer, 2014)

Vorteile	Nachteile
o Da Ampeln Verkehrsteilnehmer, die ihren Weg kreuzen könnten, zum völligen Anhalten zwingen, sollen sie es den Verkehrsteilnehmern, die das grüne Licht beobachten, ermöglichen, Straßenkreuzungen sicher und mit einer Geschwindigkeit zu überqueren, die unter der zulässigen Höchstgeschwindigkeit liegt.	o Die Ampel kann manchmal ein falsches Sicherheitsgefühl vermitteln, das zu mangelnder Wachsamkeit verleiten kann.
o Im Idealfall werden durch eine angemessene Synchronisation der Ampeln auf einer Verkehrsachse "grüne Wellen" erzeugt, die das schnelle Durchqueren von Stadtgebieten erleichtern.	o Ampeln sichern das Überqueren einer Kreuzung bei Geschwindigkeiten von mehr als 30 km/h, und es kann zu schweren Unfällen kommen, wenn sie nicht richtig beachtet werden.
o Die Reduzierung der Zyklen Bremsen - Anhalten - Beschleunigen erhöht den Fahrkomfort und senkt den Kraftstoffverbrauch.	o Außerdem verleiten Ampeln in der Grünphase die Verkehrsteilnehmer dazu, mit überhöhter Geschwindigkeit zu fahren, um die Kreuzung vor dem Ende der Grünphase zu überqueren, was die
o Auf stark befahrenen Schnellstraßen erleichtern und sichern sie das Einfädeln von Fahrzeugen aus Nebenstraßen und das Überqueren von Fußgängern.	

Das Streben nach einem effizienten Betrieb von Straßennetzen setzt eine sehr gute Kenntnis der Funktionsweise von Ampelkreuzungen voraus. Die Fahrzeiten in städtischen Gebieten hängen in erster Linie von der Zeit ab, die an Kreuzungen verloren geht, und nicht von der Geschwindigkeit, die auf den Fahrbahnen gefahren wird. Allerdings beruht die Planung von Ampelkreuzungen heute auf einfachen Berechnungsmethoden, allerdings mit recht elastischen Anpassungsvariablen (z. B. der Sättigungsgeschwindigkeit). Außerdem stellt man an einigen Kreuzungen fest, dass die Berechnungen ihre Grenzen aufzeigen. Der Leitfaden für die Planung von Kreuzungen stellt eine vereinfachte Methode vor, die Empfehlungen zur Geometrie gibt und die Verkehrsaspekte summarisch behandelt. Der Projektplaner muss die im Leitfaden genannten Werte an die jeweilige Kreuzung anpassen. Die Aufgabe der Kreuzung ist die zeitliche Steuerung der Verkehrsströme. Sie soll die Zulassung aller Verkehrsträger zeitlich entkoppeln und den Abfluss der verschiedenen Modi unter optimalen Sicherheitsbedingungen ermöglichen. (Mathias Mitteregger, 2020)

a) Intervehikelzeit

Die Intervehikelzeit (siehe Abschnitt 2.1.5 und Abb. 5) kann verwendet werden, um die Zeit zu schätzen, die eine Warteschlange braucht, um eine grüne Ampel zu passieren.

b) Räumungszeit

Die verlorene Zeit ist ein Maß für die Zeit, die in einer Phase nicht genutzt wird (siehe Abbildung 15), wenn keine Ampel grün ist. In der Regel ist sie die Summe von drei Werten, die geschätzt werden durch 1) Das gelbe Licht, das den Stopp einer Phase markiert, dauert in städtischen Gebieten durchschnittlich 3 Sekunden 2) Die rote Sicherheitsampel, die eine Räumungszeit zwischen zwei Phasen darstellt, variiert je nach Größe der Kreuzung. 3) Die Anfahrzeit zu Beginn einer Phase (d. h. die Summe der Reaktionszeit und Beschleunigungszeit). Dieser verursacht durchschnittlich 4 Sekunden Verzögerung, die sich in der Regel auf die ersten vier Fahrzeuge in jeder Spur verteilen. Die Abbildung stellt das Verhalten der Startzeit dar, die sich nach und nach zur Inter-Fahrzeug-Zeit hin stabilisiert.

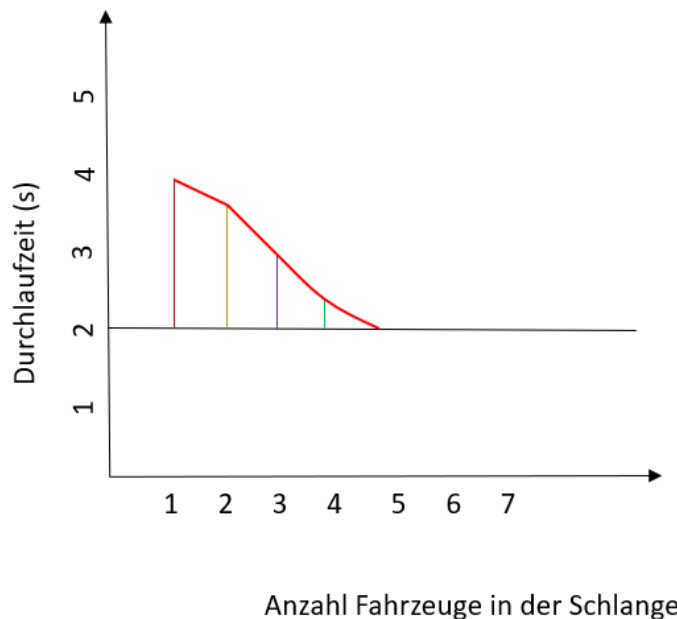


Abbildung 15: Reaktion von Fahrzeugen zum Anfahren beim Umschalten der Ampel auf Grün.

c) Zykluszeit

Die Festlegung einer Zykluszeit kann verschiedenen Zielen folgen, wie z. B. der Minimierung der Wartezeit oder der Maximierung des Durchsatzes. Kreuzungen besitzen in der Regel alle eine gleiche Zykluszeit, die als Grundlage für ihre Koordination

dient, da sie eine feste zeitliche Beziehung darstellt. Eine ausreichend große Zykluszeit ermöglicht es, dass die Grünphasen der von ihr umfassten Ampelanlagen variabel sind.

d) Grüne Ampelzeit

Ein Zyklus besteht aus mehreren Phasen, die jeweils eine Ampeldauer haben, deren richtige Einstellung von entscheidender Bedeutung ist. Eine zu kurze Phase kann dazu führen, dass eine Spur nicht genügend Zeit hat, sich zu entladen. Umgekehrt verlängert eine zu lange Phase die Wartezeit der Autofahrer in den anderen Phasen, ohne hilfreich zu sein. (Machemehl, 1997)

Die Grünzeit für eine Phase wird in der Regel proportional zur Zykluszeit berechnet, wobei verschiedene Einschränkungen (z. B. statistische bekannten Durchsatz- oder Wartezeiten). In einigen Systemen wird diese Zeit dynamisch berechnet und ist zwischen einer minimalen und einer maximalen Zeit begrenzt. Sobald die minimale Grünzeit abgelaufen ist, kann eine zusätzliche Zeit die Phase verlängern, bis schließlich die maximale Zeit erreicht ist. Bei jedem neuen Fahrzeug, das nahe genug an das Vorherige herankommt, wird die gesamte Grünzeit im Zyklus um einige Sekunden erhöht, sodass das neue Fahrzeug genug Zeit hat und weiterfahren kann (Abbildung 16).

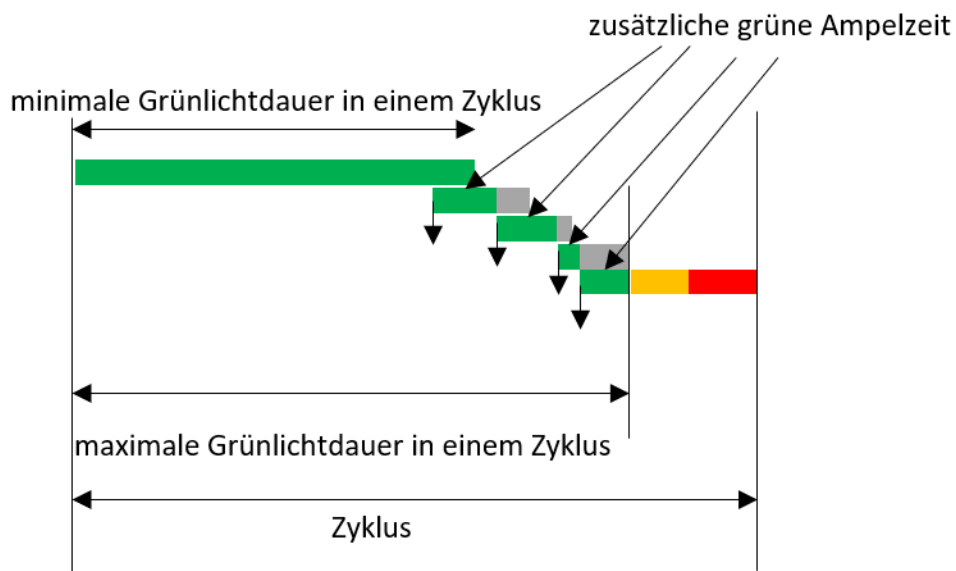


Abbildung 16: Dynamische Verwaltung der Grünlichtdauer. (Proff, 2020)

e) **Koordinierung der Ampeln zwischen Kreuzungen**

Die Koordinierung oder Synchronisierung der Ampeln an mehreren aufeinanderfolgenden Knotenpunkten ist gleichbedeutend mit der Schaffung eines Fortschrittsstreifens (grüne Welle), auf der sich ein Fahrzeugstrom bewegt, ohne angehalten zu werden. Wenn das System keine Koordination hat, ist die Progression nicht konstant und es kommt zu Stopps, Verzögerungen. Jedes Mal, wenn Autos anhalten, geht also grüne Ampelzeit verloren und die Verzögerungszeit wird verlängert. In herkömmlichen Systemen erfolgt die Koordinierung in den meisten Fällen durch die Festlegung einer identischen Zykluszeit für jede Kreuzung einer Hauptverkehrsader oder sogar durch die Festlegung identischer, aber versetzter Phasenzeiten. Das bedeutet, dass ein Signalsystem in der Regel auf einer einzigen Achse synchronisiert wird. Für jede Kreuzung wird eine Koordination auf eine einzige Phase pro Zyklus angewendet, die die Bewegungen von und zur Hauptverkehrsstraße einschließt. Diese Phase wird in der Regel an letzter Stelle im Zyklus platziert, um ihr möglicherweise mehr Zeit als geplant zuzuweisen, falls die unkoordinierten Phasen früher beendet werden (Die Nachfrage ist geringer als die geplante Zeit).

f) **Kapazität der Knotenpunkte**

Die Kapazität C_k der Knotenpunkte wird durch die Formel 10 definiert:

Formel 11: Kapazität des Knotenpunktes

$$C_k = Q_{max} \frac{(t_z - t_s)}{t_z}$$

Q_{max} : maximal erreichbarer Verkehrsfluss.

t_z : Zyklusdauer.

t_s : Dauer der Stillstandzeit während eines Zyklus.

Es gibt keine feste Regel für die Bestimmung der idealen Zyklusdauer oder der Dauer einer grünen oder roten Ampel während eines Zyklus. Dies hängt von dem Fall ab, der untersucht wird, und davon, ob der Durchfluss einer ganzen Stadt, eines Stadtviertels oder nur einer Kreuzung untersucht wird. (Holzapfel, 2020) (Transportation, kein Datum)

3.2.1.2 Kreisverkehr

Ein Kreisverkehr ist eine Art niveaugleiche Kreuzung zwischen zwei oder mehr Straßen. Sie erfüllt die Funktion der Verkehrsmoderation und -beruhigung. Die Kreuzung zwischen den Straßen wird durch eine Einbahnstraßenschleife um eine Runde Verkehrsinsel ersetzt. Im Gegensatz zu den alten kreisförmigen Verkehrsinseln arbeitet der neue Kreisverkehr mit einer Verkehrsflussregelung, die lediglich den Fahrzeugen Vorrang gibt, die in den Ring eingefahren sind. Der Vergleich zwischen einer Ampelkreuzung oder einem herkömmlichen Kreisverkehr mit Vorfahrt und einem Kreisverkehr mit Vorfahrt für die durchfahrenden Fahrzeuge hat unbestreitbare Vorteile (Tabelle 4).

Im Vergleich zu einer Ampelkreuzung benötigen Kreisverkehre im Allgemeinen mehr Platz und sind mit höheren Baukosten verbunden. In der Nähe von Krankenhäusern können sie problematisch sein, da sie keine reservierte Fahrspur für Rettungsfahrzeuge bereitstellen können. Eine Verknüpfung einer Ampel mit einem funkgesteuerten Rettungsfahrzeug könnte besser den Verkehr anhalten. In einem Kreisverkehr ist es außerdem nicht möglich, eine dem öffentlichen Verkehr vorbehaltene Fahrspur zu garantieren. Der Kreisverkehr setzt aufgrund seiner Beschaffenheit und seines Aufbaus die Gleichwertigkeit der Straßen voraus. Daher ist es schwierig, Straßen mit sehr unterschiedlicher Bedeutung und unterschiedlichem Verkehrsfluss zu hierarchisieren und zwischen öffentlichen und privaten Fahrzeugen zu unterscheiden. Kreisverkehre sind für Radfahrer und Fußgänger oft schwer zu überqueren und benachteiligen sie (Tabelle 3). (Haller, 2006)

Tabelle 3: Vorteile und Nachteile des Kreisverkehrs. (VERKEHRSWESSEN, 2021)

Vorteile	Nachteile
Geläufigkeit	Umweg für Fußgänger
Geschwindigkeitsreduzierung	heikel für Radfahrer
Unterdrückung von Frontalaufprall	keine "geschützte" Phase
Lärmreduzierung	

Wie bei den Ampeln gibt es keine feste Regel dafür, ob eine Kreuzung eher mit Ampeln ausgestattet werden sollte oder ob ein Kreisverkehr effektiver ist. Das hängt vom jeweiligen Fall ab und davon, ob man den Verkehrsfluss einer ganzen Stadt, eines Stadtteils oder nur einer Kreuzung untersucht. (Transportation, kein Datum)

Um den Verkehr zu steuern und zu verbessern und Staus zu vermeiden, können Ampeln, Kreisverkehre oder eine Kombination aus beiden eingesetzt werden. Es gibt jedoch auch andere Möglichkeiten, um das Verkehrsmanagement auf makroskopischer Ebene zu verbessern. Die Priorisierung von Straßen bei Kreuzungen durch Vorfahrtsschilder und Geschwindigkeitsbegrenzungen sind potenzielle Lösungen, die zur Verbesserung des Verkehrsflussmanagements beitragen können. Diese Lösungen allein sind aber nicht ausreichend. (verkehrswesen, 2012)

a) Geschwindigkeitsbegrenzung

Durch das Fundamentaldiagramm wird deutlich, dass das Ziel der Vermeidung von Staus darin besteht, die Dichte zu begrenzen. Dies hat zur Folge, dass der Fluss kontrolliert wird (also unterhalb des maximalen Flusses). Um dies zu erreichen, kann eine Verringerung der Geschwindigkeit ein Mittel sein, um den Fluss zu reduzieren und potenziell Staus zu vermeiden. Dies ist von Fall zu Fall unterschiedlich, und eine Geschwindigkeitsreduzierung bedeutet nicht unbedingt eine Verbesserung des Verkehrsflusses oder eine Verringerung bzw. Beseitigung von Staus. (Prof. Dr.-Ing. Ralf Roos, 2012)

b) Verkehrszeichen

Vorfahrtsschilder wie ‚Stopp‘ oder Vorfahrtsstraßen können auch den Verkehrsfluss in den Knotenpunkten beeinflussen, indem sie die Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer verringern, insbesondere wenn die Hauptstraße einen hohen Verkehrsfluss aufweist und die angrenzenden Straßen einen geringen Verkehrsfluss haben. Daher ist es möglich, diese Schilder zu verwenden, um die Fahrzeuge auf den Vorfahrtsstraßen nicht anzuhalten (im Gegensatz zu LZA). (Holzapfel, 2020)

3.3 SUMO

Für die Simulation gibt es eine Vielzahl von Softwareprogrammen, die für die Durchführung von Straßenverkehrssimulationen auf der Ebene von Kreuzungen, Städten, Regionen und sogar Ländern zur Verfügung stehen. Die verschiedenen Programme verwenden unterschiedliche Modelle und bieten unterschiedliche Lösungen an. Einige sind einfacher zu bedienen als andere, und einige sind flexibler als andere, was Änderungen und Anpassungen betrifft. Einige Softwareprogramme haben auch den Vorteil, dass sie Open Source sind und

kostenlos zur Verfügung stehen, während andere kostenpflichtig sind, aber den Vorteil haben, dass sie mikroskopische, mesoskopische und makroskopische Modelle simulieren können. Schließlich simulieren einige Programme auch die Aktionen von Fußgängern und passen Autos auf unterschiedliche Weise an. Die Wahl des Simulationstools für diese Arbeit fiel auf SUMO, da es mehrere der angestrebten Vorteile (Open-Source, mikroskopisch, Kreuzung und Personalisierung von Autos) abdeckt.

SUMO (Simulation of Urban Mobility) ist ein Open-Source-Verkehrssimulationssoftware für diskrete Zeit, kontinuierlichen Raum und Mikroskopie, der vollständig in C++ erstellt wurde und die Modellierung von Straßenverkehrsströmen ermöglicht. SUMO ermöglicht die Modellierung von intermodalen Verkehrssystemen. Das schließt Straßenfahrzeuge, öffentlichen Verkehrsmittel und Fußgänger ein. Darüber hinaus enthält SUMO eine Fülle von weiteren Werkzeugen, die Kernaufgaben bei der Erstellung, Ausführung und Auswertung von Verkehrssimulationen automatisieren. Dazu gehören Netzimport, Routenberechnung, Visualisierung und Emissionsberechnung. SUMO kann mit benutzerdefinierten Modellen erweitert werden und bietet verschiedene APIs, um die Simulation aus der Ferne zu steuern. Wenn gewünscht, kann jedes Fahrzeug genauer beschrieben werden. Start- und Zieleigenschaften, wie die zu benutzende Fahrspur, die Geschwindigkeit oder die Position, können definiert werden. Jedem Fahrzeug kann ein Typ zugewiesen werden, der die physikalischen Eigenschaften des Fahrzeugs und die Variablen des verwendeten Bewegungsmodells beschreibt. Den Fahrzeugen können auch eine der verfügbaren Schadstoff- oder Lärmemissionsklassen zugewiesen werden. Mithilfe zusätzlicher Variablen kann das Erscheinungsbild des Fahrzeugs in der grafischen Benutzeroberfläche der Simulation festgelegt werden. Das Autoverfolgungsmodell beschreibt, wie das nachfolgende Fahrzeug mit dem führenden Fahrzeug in der gleichen Spur reagiert. Das Krauss-Verkehrsmodell ist das Standardmodell für die Autoverfolgung, das im SUMO-Simulator verwendet wird. Außerdem ermöglicht SUMO den Import einer realen Karte aus OpenStreetMap (OSM). SUMO setzt Tools wie ‚Netconvert‘ ein, mit dem OSM-Dateien nahtlos in die SUMO-Straßennetz-Topologie im XML-Format umgewandelt werden können.

4. Simulation und Ergebnisse

In diesem Teil wird erläutert, welche Kreuzung gewählt wurde und warum. Dann folgt eine Aufnahme des aktuellen Zustands dieser Kreuzung. Anschließend werden verschiedene Szenarien entworfen und getestet. Schließlich wird eine Auswahl getroffen, die von den Ergebnissen abhängt.

4.1 Entscheidung der Kreuzung

Der Untersuchungsgegenstand befindet sich in der Stadt Köln in Deutschland. Die untersuchte Kreuzung befindet sich im Stadtteil Kalk. Es handelt sich um einen beliebten Stadtteil mit einer recht hohen Bevölkerungsdichte. Mit einer Einwohnerkonzentration von über 8116 Einwohner/km² ist Kalk der Stadtteil mit der höchsten Einwohnerkonzentration in Köln. In diesem Stadtteil befinden sich mehrere Zentren, die für die Bewohner und Besucher anderer Stadtteile und Städte lebenswichtig und/oder von hohem Interesse sind. In der Abbildung 17 sind die wichtigsten Punkte auf der Karte je nach Thema farblich markiert. Es gibt mehrere Einkaufszentren, darunter das große Zentrum der Kalk Arcaden, und mehrere klassische Supermärkte (Aldi, Lidl, Kaufland). Darüber hinaus gibt es typische Geschäfte aus anderen Ländern und Kulturen, die Waren zur Verfügung stellen, von denen sie gelegentlich die einzigen Anbieter sind. Andererseits verursachen diese Geschäfte einen erhöhten Verkehrsfluss durch die LKWs, die die Waren beliefern. Diese verschiedenen Arten von Geschäften wurden grün markiert.

In Rot ist markiert, was als ein sehr großes medizinisches Zentrum angesehen werden kann, zwischen dem evangelischen Krankenhaus Kalk, dem Deutschen Informations-Zentrum für Radiologie und dem Medizinischen Versorgungszentrum Kalk sowie den verschiedenen Facharztpraxen, die sich in den angrenzenden Straßen befinden. Die Anzahl der Patienten, insbesondere die Anzahl der Betten im Krankenhaus, die 325 beträgt, verursacht täglich eine sehr hohe Anzahl an Besuchen.

In Lila sind drei Dienstleistungszentren für Einwohner, deutsche und EU-Bürger sowie Nicht-EU-Bürger markiert: das Bürgeramt Kalk, die zentrale Ausländerbehörde und die Bürgerdienste. Auch in diesem Fall ist die Anzahl der täglichen Besucher während der Geschäftszeiten wichtig.

[Analyse und Verbesserung des Straßenverkehrs an der Kreuzung Kalk Kapelle in Köln mithilfe des Simulationstools SUMO]

In braun sind mehrere Betriebe mit hohem Arbeitnehmeraufkommen markiert, darunter die Abfahlwirtschaftsbetriebe (AWB), der Motorenhersteller Deutz A.G., ein Logistikunternehmen und andere Unternehmen. Blau markiert sind verschiedene Schulen, Gymnasien und Ausbildungszentren, die nicht nur natürlich einen großen Strom von Schülern anziehen, sondern auch, dass diese Schüler größtenteils morgens von ihren Eltern mit dem Auto gebracht und am frühen Nachmittag wieder abgeholt werden. Schließlich sind wichtige Haltestellen, die von mindestens zwei verschiedenen Verkehrsmitteln angefahren werden (Bus, U-Bahn, s-Bahn), grau markiert. Dies hat zur Folge, dass es in diesen Bereichen einen großen Fußgängerstrom gibt.

Die Hauptstraßen sind voll von Geschäften, Restaurants, Dienstleistungen und anderen Einrichtungen. Folglich sind die Straßen regelmäßig mit Fußgängern gefüllt, die die Straßen überqueren. Aus diesem Grund gilt eine strenge Geschwindigkeitsbegrenzung. Darüber hinaus wurden mehrere Ampeln installiert, damit die zahlreichen Fußgänger die Straßen überqueren können. Aufgrund der stark vertretenen Aktivitäten ist der Autoverkehr zudem sehr hoch. Trotz zahlreicher privater Parkplätze sind diese oft voll und die Parkplätze in den Straßen sind überfüllt. Außerdem werden Autos oft an verbotenen Stellen geparkt.

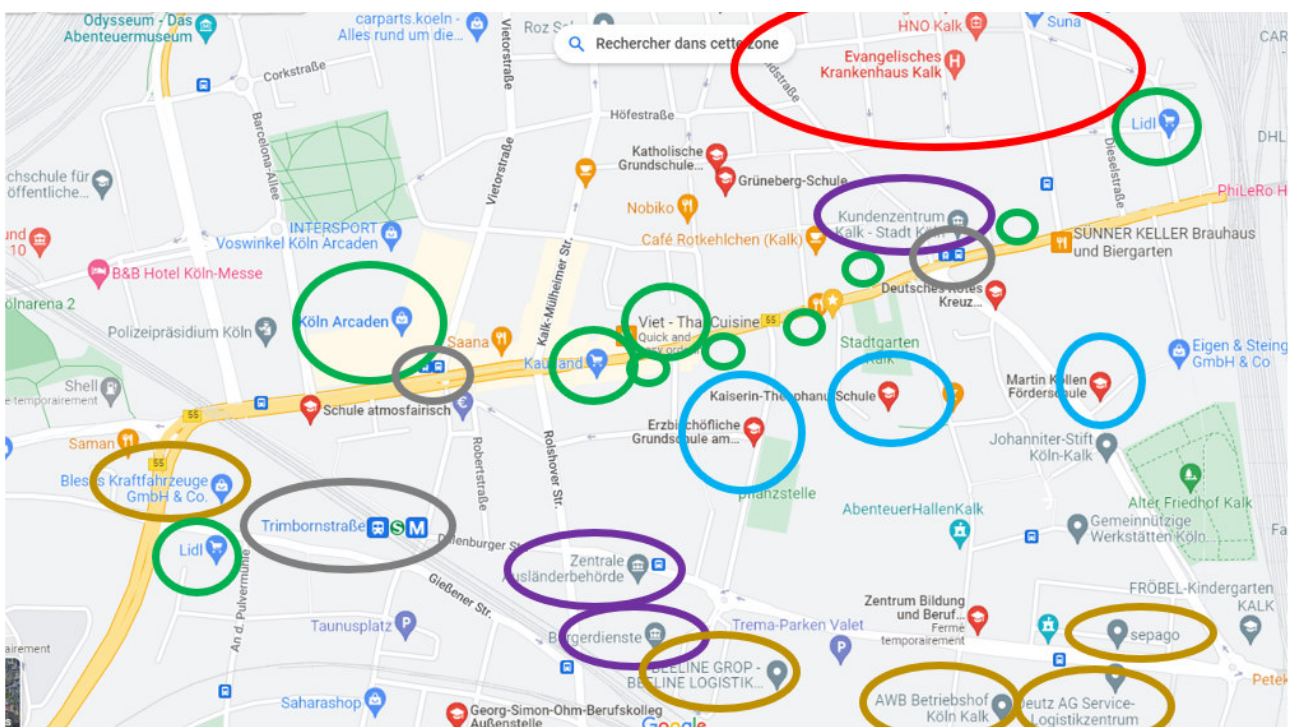


Abbildung 17: Überblick über den Stadtteil Kalk und seinen Kernbereich (Google maps)

[Analyse und Verbesserung des Straßenverkehrs an der Kreuzung Kalk Kapelle in Köln mithilfe des Simulationstools SUMO]

Die ausgewählte Kreuzung wird als der Knotenpunkt „Kalk Kapelle“ betrachtet. Sie befindet sich am Ende des stark befahrenen Bereichs der Hauptstraße, an der Kreuzung der Kalkerhauptstraße, der Kapellenstraße und der Steprathstraße. Rund um die Kreuzung Kalk Kapelle gibt es mehrere Umstände, die dazu führen, dass diese Kreuzung sehr stark befahren ist. Diese Kreuzung (siehe Abbildung 18) muss dem Fluss mehrerer Autos standhalten. Das Bürgeramt (lila markiert) auf der Kalker Hauptstraße und der Steprathstraße zieht eine große Anzahl von Besuchern an. Diese Besucher teilen sich auf in solche, die zu Fuß oder mit dem Fahrrad kommen, solche, die mit öffentlichen Verkehrsmitteln anreisen (grau markiert) und schließlich solche, die sich mit ihren eigenen Fahrzeugen fortbewegen. Die ersten beiden Arten von Besuchern erhöhen den Fußgängerstrom, während die letzte Art von Besuchern zu einem Anstieg des Verkehrsaufkommens führt.

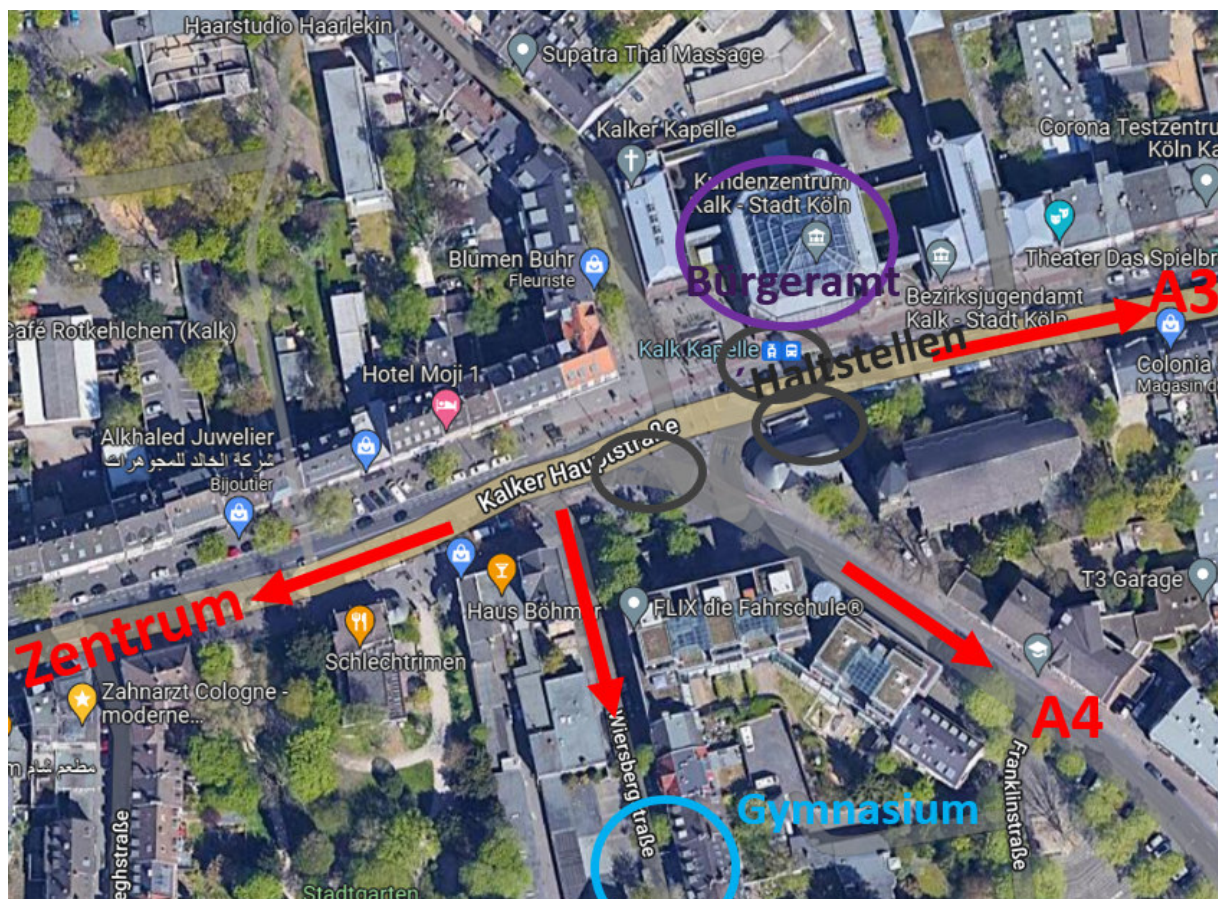


Abbildung 18: Kreuzung Kalk Kapelle

Die Hauptverkehrsader ist die Kalkerhauptstraße. Sie ist eine Straße, die in beide Richtungen führt. Es ist eine Straße mit nur einer Fahrspur pro Richtung, einschließlich einer Fahrspur für Fahrräder. In östlicher Richtung führt die Straße stadtauswärts, durch einen anderen Stadtteil und dann auf eine Autobahn (A3). In westlicher Richtung führt die Straße über

mehrere Brücken zum Rhein und dann ins Stadtzentrum. Die Kalkerhauptstraße wird im Norden von einer kleinen Straße, die Steprathstraße, gekreuzt. Für die Richtung Süd/Südost führt die Kapellenstraße in einen anderen Stadtteil zur Autobahn A4.

4.2 IST-Zustand

In diesem Teil wird der aktuelle Zustand angenommen, und zwar in Bezug auf die von Fahrzeugen befahrenen Spuren, die Fahrzeugströme für jede Spur und die Bewegungen der Fußgänger.

4.2.1 Parzellierung der verschiedenen Wege dieser Kreuzung

Um den IST-Zustand zu verstehen, muss man zunächst alle möglichen Wege in dieser Kreuzung definieren (Abbildung 19), wie folgt:

- a- Fahrzeug in der Kalker Hauptstraße, von Westen kommend in Richtung Osten fahrend.
- b- Fahrzeug in der Kalker Hauptstraße, von Westen kommend nach Süden in die Kapellenstraße fahrend.
- c- Fahrzeug in der Kapellenstraße, von Süden kommend in die Kalker Hauptstraße nach Westen fahrend.
- d- Fahrzeug in der Kapellenstraße, von Süden kommend in die Steprathstraße in Richtung Norden fahrend.
- e- Fahrzeug in der Kapellenstraße, das von Süden kommend in die Kalker Hauptstraße in Richtung Osten fährt.
- f- Fahrzeug in der Kalker Hauptstraße, von Osten kommend in die Kapellenstraße nach Süden fahrend.
- g- Fahrzeug auf der Kalker Hauptstraße, das von Osten kommend nach Westen fährt und auf der Kalker Hauptstraße bleibt.
- h- Fahrzeug auf der Kalker Hauptstraße, von Osten kommend nach Norden fahrend auf der Steprathstraße.
- i- Fahrzeug auf der Steprathstraße, von Norden kommend in die Kalker Hauptstraße nach Westen fahrend.

[Analyse und Verbesserung des Straßenverkehrs an der Kreuzung Kalk Kapelle in Köln mithilfe des Simulationstools SUMO]

Zu beachten: nur Fahrzeuge, die aus dem Osten von der Kalker Hauptstraße oder von der Kapellenstraße kommen, dürfen in die Steprathstraße einfahren. Fahrzeuge, die von der Steprathstraße kommen, dürfen nur nach rechts abbiegen, d. h. von der Kalker Hauptstraße in Richtung Westen.

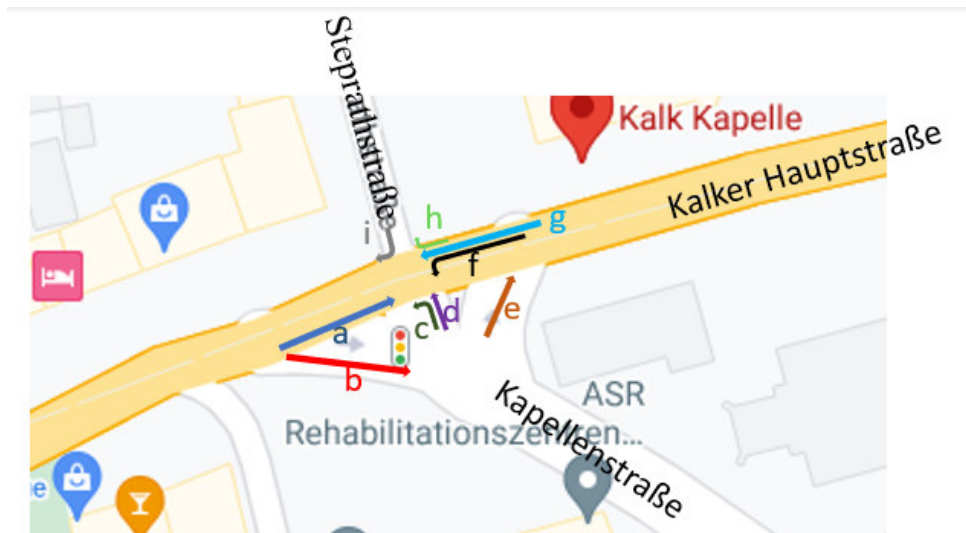


Abbildung 19: Parzellierung der verschiedenen möglichen Richtungen in der Kreuzung Kalk Kapelle.

4.2.2 Bestimmung von Durchgangsmöglichkeiten für Fußgänger

In der Abbildung 20 ist die Kreuzung Kalk Kapelle mit der Markierung von Zebrastreifen. Die Zebrastreifen sind in zwei Kategorien unterteilt: Bei Grün überqueren die Fußgänger die verschiedenen Straßen unter Beachtung der Ampeln. Blau ist der Zebrastreifen oder Zebrastreifen nach den Regeln der Vorfahrt.

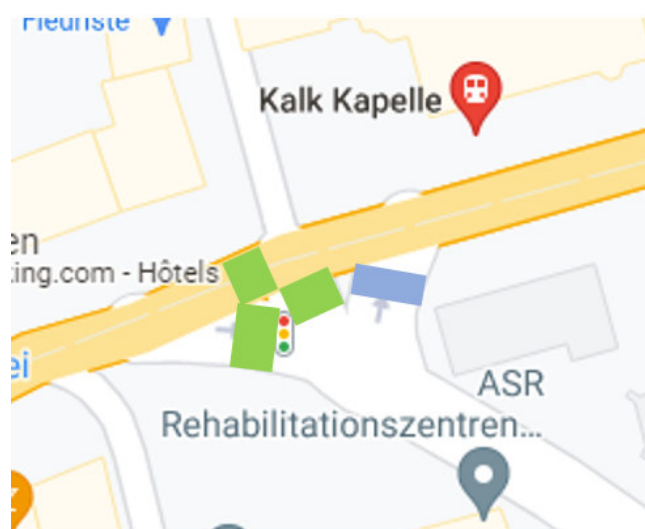


Abbildung 20: Fußgänger in Kalk Kapelle

4.2.3 Verkehrszählung an der Kreuzung Kalk Kapelle

Nachdem alle möglichen Spuren und Bewegungen für Fahrzeuge unterteilt worden waren, wurden mehrere Messungen der Verkehrsflüsse durchgeführt. Es wurden zwei Messungen zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Tagen durchgeführt, um einen Überblick über den Verkehr an dieser Kreuzung zu erhalten: Montagmorgen, wenn der Verkehr aufgrund von Schulkindern, die von ihren Eltern gefahren werden, und Arbeitern, die zur Arbeit gehen oder kommen, ziemlich stark ist, und Sonntagmorgen, wenn der Verkehr relativ gering ist, da es sich hauptsächlich um einen Ruhetag handelt.

Für die Messung des Fahrzeugflusses wurde eine Beobachtung vor Ort durchgeführt, bei der jeweils 5 Minuten lang die vorbeifahrenden Fahrzeuge berechnet wurden. Anschließend wurde eine lineare Extrapolation verwendet, um den Fahrzeugfluss pro Stunde zu berechnen. Die Beobachtungen ergaben, dass der Fahrzeugstrom dienstags 1520 Fahrzeuge pro Stunde und sonntags 645 Fahrzeuge pro Stunde beträgt (siehe Tabelle).

Tabelle 4: Verkehrsfluss Kalk Kapelle

	Tag\Spur	a	b	c	d	e	f	g	h	I	Summe
Fluss	Dienstag	390	280	120	30	170	150	290	35	55	1520
	Sonntag	120	100	60	10	80	100	150	10	15	645

Der Fluss von Fußgängern über diese Kreuzung ändert sich nicht wirklich. Was sich jedoch ändert, sind die Zeiten und Zeitpunkte der grünen Ampeln und der gesamten Zyklen. Derzeit sind alle drei Ampeln für Fußgänger gleichzeitig grün, damit Fußgänger die Straße in alle Richtungen überqueren können.

4.3 Simulation von Szenarien

Nachdem der IST-Zustand eingenommen wurde, werden nun mehrere Szenarien getestet: Änderung der Fußgängerführung durch Verschiebung der grünen Ampelzeitpunkte, Änderung der grünen Ampelzeiten für Fahrzeuge und Prüfung der Möglichkeit, die Ampeln durch einen Kreisverkehr zu ersetzen.

4.3.1 Bewertung der Genauigkeit der Simulation mit SUMO

Die Eingabe der Parameter in SUMO vom beobachteten IST-Zustand in den Realfall ergab, dass es einen Unterschied von 100 Sekunden gibt, um den beobachteten Fluss durchzu-

lassen. Tatsächlich mussten die 1520 Fahrzeuge, die die Kreuzung in 3600 Sekunden passierten, in SUMO 3700 Sekunden benötigen, um durchzukommen. Dies zeigt, dass es in SUMO eine Unsicherheit gibt, die bewertet werden muss.

4.3.1.1 Ursprung

Der IST-Zustand wurde durch mehrere Stichproben über einen Zeitraum von 15 Minuten genommen. Danach wurde eine Extrapolation auf eine Stunde durchgeführt. Um die Durchschnittsgeschwindigkeit zu berechnen, wurden die Parameter des IST-Zustands eingegeben und die Simulation des IST-Zustands durchgeführt. Mit Hilfe dieser Simulation wurde die Durchschnittsgeschwindigkeit des Verkehrs berechnet. Das Ergebnis der Simulation mit den ursprünglichen Werten des IST-Zustands ergibt jedoch einen Gesamtfluss von Fahrzeugen, die die Kreuzung überquert haben, der geringer ist als der, der durch Beobachtung und Extrapolation ermittelt wurde. Auch wenn man die Unwägbarkeiten berücksichtigt, die diese Differenz erklären können (unterschiedliche lokale und globale Anfangsgeschwindigkeiten, zufälliges Verhalten der Verkehrsteilnehmer, relative Ungenauigkeit der Extrapolation), bleiben Zweifel an der Richtigkeit der Ergebnisse von SUMO bestehen.

4.3.1.2 Vorgehen

Um die Genauigkeit der Simulationsergebnisse zu überprüfen, wurde beschlossen, die Simulationen mit einer zehnfachen Iteration zu wiederholen ($n=10$). Anschließend wird der Durchschnitt der Fahrzeugströme, die an der Kreuzung ankommen, der Durchschnitt der Fahrzeugströme, die die Kreuzung überquert haben, und der Durchschnitt der Durchschnittsgeschwindigkeiten berechnet. Dies ermöglicht die Berechnung der Standardabweichung für jeden der zuvor genannten Parameter und die Berechnung der Konfidenzintervalle.

4.3.1.3 Durchführung

Um die Genauigkeit der erhaltenen Ergebnisse zu überprüfen und anzupassen, wurde die Simulation mit einer zehnfachen Iteration ($n=10$) mit exakt denselben Flussparametern und der Anfangsposition der Fahrzeuge wiederholt. Anschließend wurde die Standardabweichung berechnet. Das Ergebnis war, dass die Ergebnisse der zehn Simulationen exakt gleich waren und somit die Standardabweichungen für Fluss und Geschwindigkeit gleich null waren.

→ Dies schließt die Hypothese aus, dass SUMO Zufälle erzeugt, die die Ergebnisse der

Simulationen verändern, selbst wenn die anfänglichen Parameter dieselben sind.

Um die Glaubwürdigkeit der von SUMO erzielten Ergebnisse zu untersuchen, wurde die Simulation mit einer zehnfachen Iteration nachvollzogen. In diesem Fall wurde jedoch bei jeder Iteration einer der Parameter leicht verändert. Dies wird bei jeder Iteration zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Anschließend werden die Mittelwerte, die Standardabweichungen und die Konfidenzintervalle berechnet. Dies wird es ermöglichen, die erzielten Ergebnisse zu bewerten und die glaubwürdigsten Werte beizubehalten.

Berechnung des Durchschnitts:

Formel 12: Durchschnitt

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Berechnung der Standardabweichung:

Formel 13: Standardabweichung

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Berechnung des Konfidenzintervalls:

Formel 14: Konfidenzintervalle

$$I_c = \left[\bar{x} - t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} ; \bar{x} + t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} \right]$$

Im Folgenden werden Ergebnisse, die außerhalb des Konfidenzintervalls erzielt wurden, ausgeschlossen. Von den Ergebnissen, die innerhalb des Vertrauensintervalls liegen, wird das beste Ergebnis ausgewählt.

4.3.2 Szenario 1: Verschiebung der Grünphasen der Ampeln für Fußgänger

Wie im IST-Zustand gesehen, leuchten die Ampeln für Fußgänger bei Grün und Rot gleichzeitig auf. Das heißt, wenn eine Ampel grün ist, kann die nächste Ampel nur dann grün werden, wenn die anderen Fußgängerampeln rot sind. In der Abbildung 21 ein Screenshot vom Ablauf der Simulation, mit kleinen blauen Punkten, den Fußgängern.

[Analyse und Verbesserung des Straßenverkehrs an der Kreuzung Kalk Kapelle in Köln mithilfe des Simulationstools SUMO]

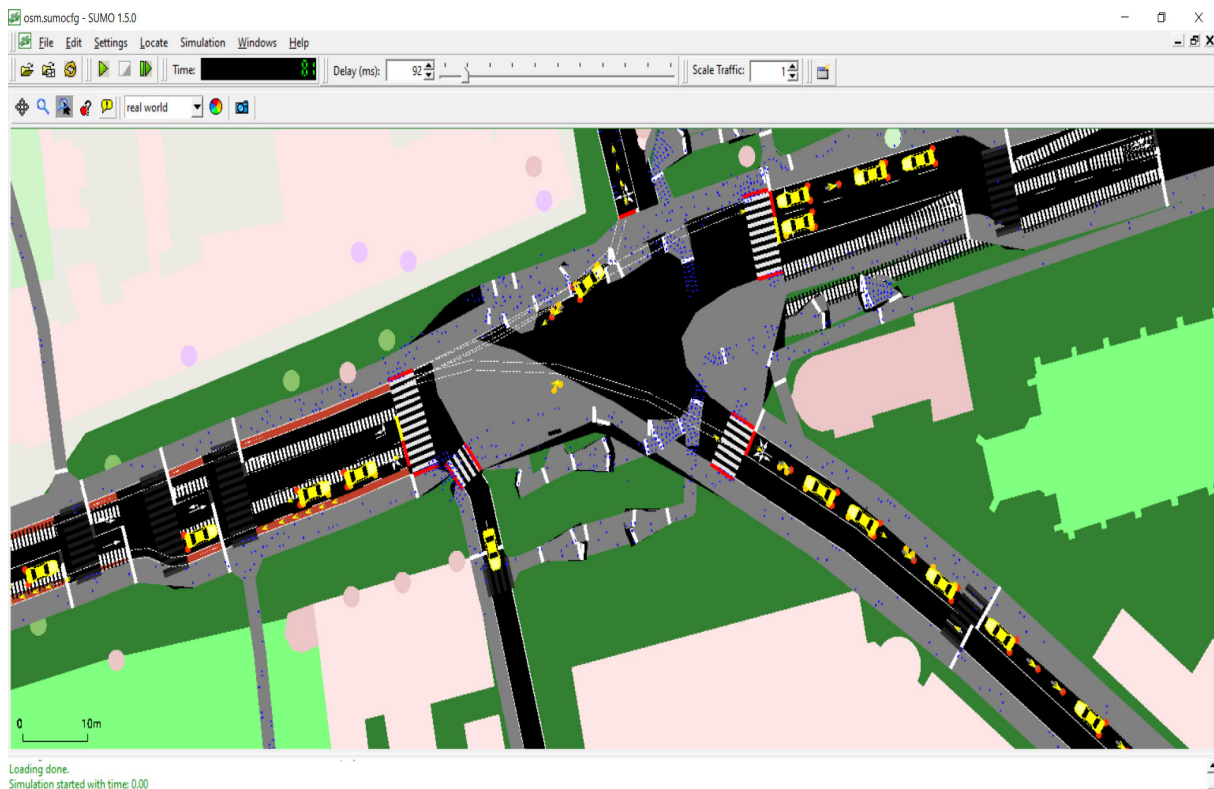


Abbildung 21: Verschiebungen der grünen Ampeln für Fußgänger in SUMO.

Das Ergebnis zeigt deutlich, dass diese Lösung den Fahrzeugstrom über die Kreuzung reduziert. Infolgedessen wächst der Stau und die Anzahl der wartenden Fahrzeuge steigt. Die Gesamtzahl der Fahrzeuge für diese Kreuzung entspricht nämlich 1520 Fahrzeugen. Im Gegensatz zum IST-Zustand, in dem die Fußgängerampeln gleichzeitig grün sind, schalten die Ampeln für die Simulation nacheinander auf grün. Folglich beträgt der Fluss der abfahrenden Fahrzeuge 1056 bei einer Ankunft von 1025 Fahrzeugen, die die Kreuzung überquert haben. Die Durchschnittsgeschwindigkeit betrug 3,88 km/h.

- Dieses Szenario wird daher verworfen. Die Verschiebung der Ampeln für Fußgänger stellt keine optimale Lösung dar, da der Autostrom und die Durchschnittsgeschwindigkeit an der Kreuzung erheblich sinken. Außerdem wäre es von Vorteil, die Fußgängerampel gleichzeitig grün zu haben, da Fußgänger so schneller in alle Richtungen überqueren können.

4.3.3 Änderung der Grün- und Zykluszeiten für Fahrzeuge

In diesem Teil werden drei Szenarien untersucht. Tatsächlich sind die Spuren, die großen Autoströmen ausgesetzt sind **a, b, c, e, f** und **g** auf der einen Seite. Eine weitere wichtige Information ist, dass die Ampel bei **a, b, f** und **g** gleichzeitig grün leuchtet. Anschließend

schalten **a** und **b** auf Rot, damit **f** auf Grün schalten kann, während **g** auf Grün bleibt. Schließlich schalten alle Ampeln auf Rot, damit **c** und **d** passieren können. Obwohl **e** keine Ampel hat, wird er stark vom Verkehrsstatus von **c** und **d** beeinflusst.

4.3.4 Szenario 2: Änderung der Grün- und Zykluszeiten für Fahrzeuge nur für die Kalkerhauptstraße

In diesem Szenario werden die Grünzeiten der Kalker Hauptstraße so lange geändert, bis das beste Ergebnis erreicht ist. Danach werden die Ampelparameter beibehalten, aber die Parameter der verschiedenen Fahrspuren (wie Geschwindigkeit und Startposition) werden über zehn Iterationen hinweg geändert. Nach der Berechnung der Standardabweichung und des Konfidenzintervalls werden die Ergebnisse, die außerhalb des Konfidenzintervalls liegen, eliminiert. Von den verbleibenden Ergebnissen wird das beste ausgewählt.

4.3.4.1 Suche der optimalen Grünzeit

Im IST-Zustand sind die Spuren **a**, **b** und **g** gleichzeitig mit einer grünen Ampel versehen, und diese Grünzeit ist auf 18 Sekunden festgelegt (bei einem Gesamtzyklus von 90 Sekunden). In diesem Szenario werden die Grünlicht- und Zykluszeiten um mehrere verschiedenen Werte angepasst. In der Tabelle 5 sind die gefundenen Werte der verschiedenen Flüsse, die von den Grünzeiten abhängen, sowie die Geschwindigkeiten aufgeführt.

Tabelle 5: Verlängerung der grünen Ampelzeiten für a, b und g

Grün für Kalker Hauptstraße	Departed vehicles	Arrived vehicles	avg. Speed (km/h)
78	1421	1401	2,6
68	1485	1468	19,8
63	1484	1463	9,6
58	1456	1433	8,1
53	1448	1428	10,2
48	1440	1418	6,9
38	1368	1355	4,3
28	1281	1267	6,4

Die Darstellung von Tabelle 5 in einem Diagramm ergibt die Abbildung 22. Diese zeigt, dass eine Verlängerung der zuvor beschriebenen Grünphase um 50 Sekunden (68s Sekunden statt 18) das beste Ergebnis mit 1468 Fahrzeugen liefert, die insgesamt die Kreuzung Kalk Kapelle überquerten, d.h. 246 Fahrzeuge pro Stunde mehr als in der Simulation des IST-Zustands.

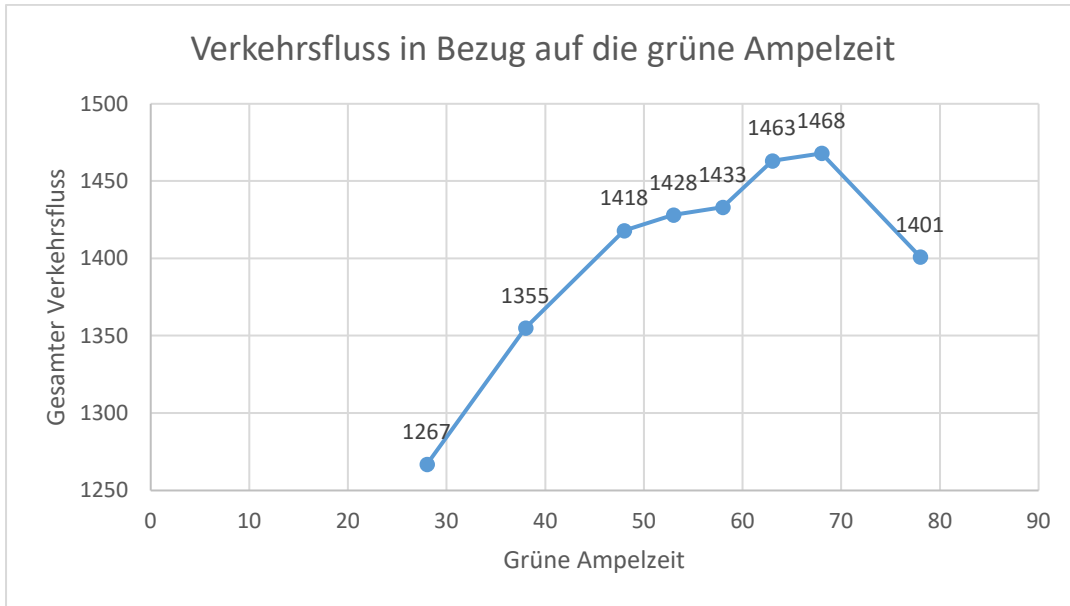


Abbildung 22: Verkehrsfluss in Bezug auf die grüne Ampelzeit

Aus Diagramm 23 geht außerdem hervor, dass bei einer Grünzeit von 68 Sekunden (50 Sekunden länger als im Ausgangszustand) die Durchschnittsgeschwindigkeit des Verkehrs mit 19,8 km/h am höchsten ist und damit weit über der ursprünglichen Durchschnittsgeschwindigkeit von 3,63 km/h liegt.

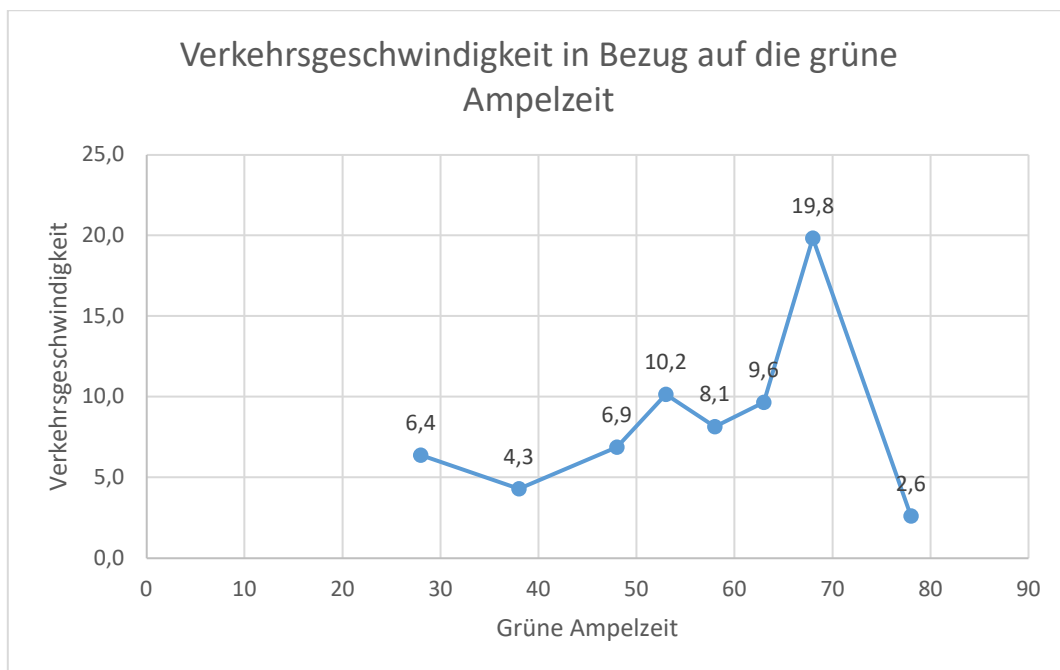


Abbildung 23: Verkehrsgeschwindigkeit in Bezug auf die grüne Ampelzeit

- Daher ist die angemessenste Lösung in diesem Szenario die Verlängerung der Grünphase der Ampel um 50 Sekunden, was die durchschnittliche Geschwindigkeit des

Verkehrs und den Strom der Fahrzeuge, die die Kreuzung passiert haben, erheblich verbessert.

4.3.4.2 Bewertung des optimalen Szenarios

Es wurden zehn Iterationen mit den gewählten Ampelparametern durchgeführt (grüne Ampel Kalkerhauptstraße 68 Sekunden). Für die Iterationen, zufällig, die Startposition der Fahrzeuge in den Spuren wurden jedes Mal leicht verändert. Es wurden unterschiedliche Ergebnisse für den in die Kreuzung einfahrenden Strom, den die Kreuzung verlassenden Strom und die Durchschnittsgeschwindigkeit des Gesamtverkehrs erzielt (Siehe Tabelle 6). Die Korrelation zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsfluss scheint nicht linear zu sein. Dies bestätigt die Relevanz der Suche nach der Standardabweichung und dem Konfidenzintervall.

Tabelle 6: Ergebnisse der zehn Iterationen mit dem optimalen Ergebnis in Kalkerhauptstraße

Iteration	Departed vehicles	Arrived vehicles	avg. Speed (Km/h)
1	1485	1468	19,6
2	1375	1361	16,2
3	1389	1341	27,0
4	1313	1285	27,4
5	1402	1395	1,8
6	1451	1423	19,8
7	1298	1270	14,8
8	1422	1401	25,9
9	1345	1330	13,3
10	1369	1358	13,0

Die Berechnung der Standardabweichung sieht in Tabelle 7 wie folgt aus.

Tabelle 7: Standardabweichung der optimalen Lösung für Grünzeit Kalkerhauptstraße

Departed vehicles	Arrived vehicles	avg. Speed (Km/h)
58,4	60,9	7,9

Im Folgenden werden die Konfidenzintervalle für die in die Kreuzung hinein- und aus ihre herausfließenden Ströme sowie die Durchschnittsgeschwindigkeiten dargestellt (siehe Tabelle 8). Daher werden in Tabelle 8 nur die Daten berücksichtigt, die den definierten Konfidenzintervallen entsprechen.

Tabelle 8: Konfidenzintervall der optimalen Lösung für Grünzeit Kalkerhauptstraße

Departed vehicles	Arrived vehicles	avg. Speed (Km/h)
[1348 ; 1421]	[1325 ; 1401]	[13,0 ; 22,8]

Nach Berücksichtigung der Bedingungen für die Konfidenzintervalle konnten nur zwei Ergebnisse (Iteration 2 und 10) festgehalten werden. Das Beste der beiden Ergebnisse ist Iteration Nummer 2 mit einem Fluss, der die Kreuzung verlässt und 1361 Kfz/h beträgt (siehe Tabelle 9). Darüber hinaus hat diese Lösung eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 16,2 km/h (ca. 3 km/h mehr als die andere Lösung).

Tabelle 9: Gewählte Lösung für Szenario 2

Iteration	Departed vehicles	Arrived vehicles	avg. Speed (Km/h)
2	1375	1361	16,2
10	1369	1358	13,0

4.3.5 Szenario 3: Änderung der Grün- und Zykluszeiten für Fahrzeuge nur für die Kapellenstraße

In diesem Szenario werden die Grünzeiten der Kapellenstraße so lange geändert, bis das beste Ergebnis erreicht ist. Danach werden die Ampelparameter beibehalten, aber die Parameter der verschiedenen Fahrspuren (wie Geschwindigkeit und Startposition) werden über zehn Iterationen hinweg geändert. Nach der Berechnung der Standardabweichung und des Konfidenzintervalls werden die Ergebnisse, die außerhalb des Konfidenzintervalls liegen, eliminiert. Von den verbleibenden Ergebnissen wird das beste ausgewählt.

4.3.5.1 Suche der optimalen Grünzeit

Im IST-Zustand sind die Spuren c und d gleichzeitig mit einer grünen Ampel versehen, und diese Grünzeit ist auf 25 Sekunden festgelegt (bei einem Gesamtzyklus von 90 Sekunden). In diesem Szenario werden die Grünlicht- und Zykluszeiten um mehrere verschiedenen Werte verlängert. In der Tabelle 10 sind die gefundenen Werte der verschiedenen Flüsse, die von den Grünzeiten abhängen, sowie die Geschwindigkeiten aufgeführt.

Tabelle 10: Verlängerung der grünen Ampelzeiten für c und d

Grün für Kapellenstraße	Departed vehicles	Arrived vehicles	avg. Speed (km/h)
85	863	849	0,6
75	892	877	1,6
70	904	890	0,8
65	939	921	7,4
60	956	941	3,6
55	993	976	3,0
45	1048	1033	4,0
35	1135	1117	7,1
15	1247	1233	20,2
10	1195	1175	6,1

Aus dieser Tabelle lässt sich Diagramm (Abbildung 24) generieren. Diese zeigt, dass eine Änderung der zuvor beschriebenen Grünphase um 10 Sekunden weniger (15s Sekunden statt 25) das beste Ergebnis mit 1233 Fahrzeugen liefert, die insgesamt die Kreuzung Kalk Kapelle überquerten, d.h. 4 Autos pro Stunde mehr weniger in der Simulation des IST-Zustands.

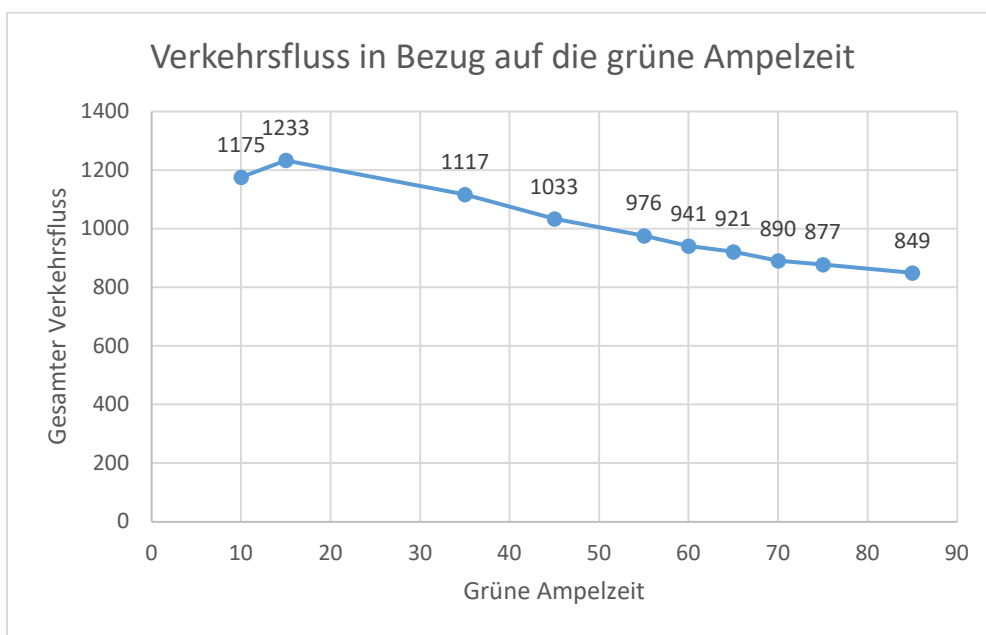


Abbildung 24: Verkehrsfluss in Bezug auf die grüne Ampelzeit

Mithilfe von Tabelle 11 wurde das Diagramm (Abbildung 25) erstellt, das die unterschiedlichen Durchschnittsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von den verschiedenen getesteten Grünzeiten zeigt. Das Ergebnis ist, dass auch hier, wie beim Verkehrsfluss, die höchste Durchschnittsgeschwindigkeit 20,2 km/h beträgt, wenn die Grünphase um 10 Sekunden verkürzt wird (d.h. 15 Sekunden für die Grünphase).

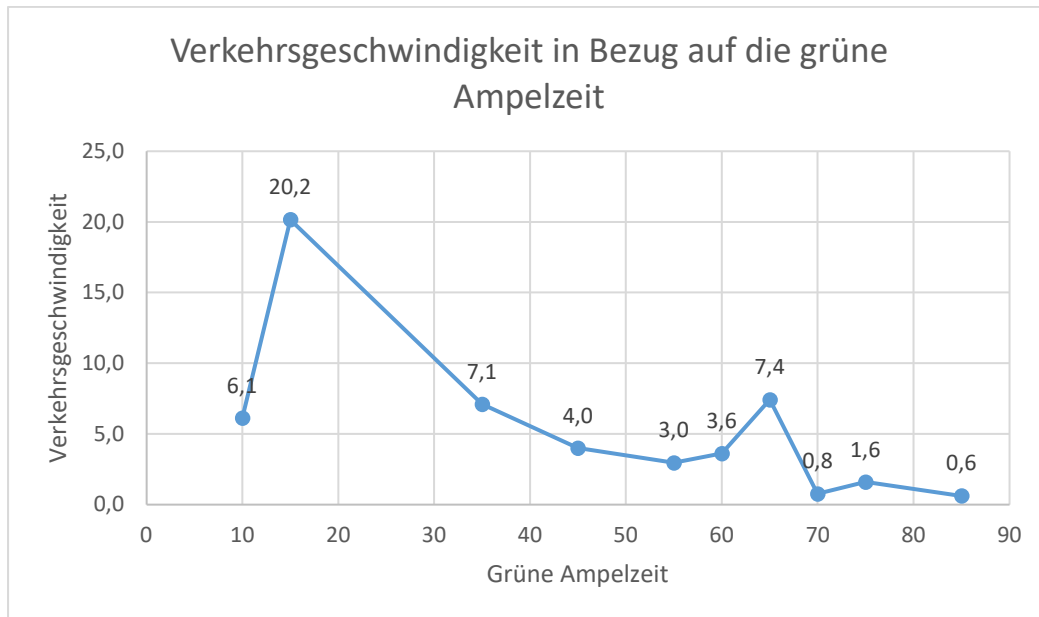


Abbildung 25: Verkehrsgeschwindigkeit in Bezug auf die grüne Ampelzeit

- Daher ist die angemessenste Lösung in diesem Szenario die Verkürzung der Grünphase der Ampel um 10 Sekunden, was die durchschnittliche Geschwindigkeit des Verkehrs, die die Kreuzung passiert haben, erheblich verbessert. Andererseits führte dieses Szenario nicht zu einer Verbesserung des Fahrzeugflusses im Vergleich zum Ist-Zustand.

4.3.5.2 Bewertung des optimalen Szenarios

Es wurden zehn Iterationen mit den gewählten Ampelparametern durchgeführt (grüne Ampel Kapellenstraße 15 Sekunden). Für die Iterationen, zufällig, die Startposition der Fahrzeuge in den Spuren wurden jedes Mal leicht verändert. Es wurden unterschiedliche Ergebnisse für den in die Kreuzung einfahrenden Strom, den die Kreuzung verlassenden Strom und die Durchschnittsgeschwindigkeit des Gesamtverkehrs erzielt (Siehe Tabelle 11). Die Korrelation zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsfluss scheint nicht linear zu sein. Dies bestätigt die Relevanz der Suche nach der Standardabweichung und dem Konfidenzintervall.

Tabelle 11: Ergebnisse der zehn Iterationen mit dem optimalen Ergebnis in Kapellenstraße

Iteration	Departed vehicles	Arrived vehicles	avg. Speed (Km/h)
1	1233	1231	20,2
2	1201	1190	18,0
3	1189	1175	7,6
4	1187	1170	1,4
5	1203	1194	25,9
6	1190	1182	16,2
7	1156	1120	10,1
8	1175	1163	9,0
9	1202	1187	6,5
10	1239	1215	17,3

Die Berechnung der Standardabweichung sieht in Tabelle 12 wie folgt aus.

Tabelle 12: Standardabweichung der optimalen Lösung für Grünzeit Kapellenstraße

Departed vehicles	Arrived vehicles	avg. Speed (Km/h)
24,7	30,0	7,5

Nach Berücksichtigung der Bedingungen für die Konfidenzintervalle konnte nur ein Ergebnis (Iteration 6) festgehalten werden. Das beste Ergebnis ist mit einem Zufluss von 1190 Kfz/h und einem Abfluss von 1182 Kfz/h bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 16,2 km/h (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Gewählte Lösung für Szenario 3

Iteration	Departed vehicles	Arrived vehicles	avg. Speed (Km/h)
6	1190	1182	16,2

4.3.6 Szenario 4: Änderung der Grün- und Zykluszeiten für Fahrzeuge für die Kalkerhauptstraße und die Kapellenstraße

In diesem Szenario werden die Grünzeiten der Kalker Hauptstraße sowie der Kapellenstraße so lange geändert, bis das beste Ergebnis erreicht ist. Danach werden die Ampelpa-

[Analyse und Verbesserung des Straßenverkehrs an der Kreuzung Kalk Kapelle in Köln mithilfe des Simulationstools SUMO]

parameter beibehalten, aber die Parameter der verschiedenen Fahrspuren (wie Geschwindigkeit und Startposition) werden über zehn Iterationen hinweg geändert. Nach der Berechnung der Standardabweichung und des Konfidenzintervalls werden die Ergebnisse, die außerhalb des Konfidenzintervalls liegen, eliminiert. Von den verbleibenden Ergebnissen wird das beste ausgewählt.

4.3.6.1 Suche der optimalen Grünzeit

In diesem Szenario wird eine Simulation durchgeführt, die die Szenarien 2 und 3 insofern mischt, als dass die Grünzeit der Fahrzeuge, die von der Kalker Hauptstraße und der Kapellenstraße kommen. Bei diesem Szenario beginnt die Simulation mit den optimalen Werten der beiden anderen Szenarien, d. h. einer Verlängerung der ersten Grünphase um 50 Sekunden (d. h. 68 Sekunden) und einer Verkürzung der zweiten Grünphase um 10 Sekunden (d. h. 15 Sekunden). Danach wurde die Zeit der ersten grünen Ampel um 40 Sekunden (also insgesamt 58 Sekunden) verkürzt, während die zweite grüne Ampel bei 15 Sekunden blieb. Die dritte Simulation in diesem Szenario bestand darin, die Zeit nur für die zweite grüne Ampel, um weitere 5 Sekunden zu reduzieren (d. h. 10 Sekunden Dauer). In Tabelle 8 die Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse. Das beste Ergebnis für den Verkehrsfluss war die Verlängerung der ersten grünen Ampel auf 58 Sekunden und die Verkürzung der zweiten grünen Ampel auf 15 Sekunden, wobei 1375 Fahrzeuge die Kreuzung überquerten, was 138 Fahrzeugen pro Stunde mehr als im Ist-Zustand entspricht. Auf der anderen Seite war das beste Ergebnis bei der Durchschnittsgeschwindigkeit, wenn die erste Ampel auf 58 Sekunden verlängert und die zweite Ampel auf 10 Sekunden verkürzt wurde, mit 9,1 km/h, 5,5 km/h mehr als in Ist-Zustand (Siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Kombinierte Anpassung der Dauer der grünen Ampel

Grün für Kalker Hauptstraße	Grün für Kapellenstraße	Departed vehicles	Arrived vehicles	avg. Speed (km/h)
68	15	1374	1353	6,8
58	15	1396	1375	6,8
58	10	1329	1306	9,1

- Daher ist die angemessenste Lösung in diesem Szenario die Verlängerung der ersten grünen Ampel auf 58 Sekunden und die Verkürzung der zweiten grünen Ampel auf 15 Sekunde; Dadurch werden sowohl der Verkehrsfluss als auch die Durchschnittsgeschwindigkeit im Vergleich zum Ist-Zustand erheblich verbessert.

Es wurden zehn Iterationen mit den gewählten Ampelparametern durchgeführt (grüne Ampel Kalkerhauptstraße 68 Sekunden, grüne Ampel Kapellenstraße 15 Sekunden). Für die Iterationen, zufällig, die Startposition der Fahrzeuge in den Spuren wurden jedes Mal leicht verändert. Es wurden unterschiedliche Ergebnisse für den in die Kreuzung einfahrenden Strom, den die Kreuzung verlassenden Strom und die Durchschnittsgeschwindigkeit des Gesamtverkehrs erzielt (Siehe Tabelle 15). Die Korrelation zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsfluss scheint nicht linear zu sein. Dies bestätigt die Relevanz der Suche nach der Standardabweichung und dem Konfidenzintervall.

Tabelle 15: Ergebnisse der zehn Iterationen mit dem optimalen Ergebnis in Kapellenstraße gemischt mit Kalkerhauptstraße

Iteration	Departed vehicles	Arrived vehicles	avg. Speed (Km/h)
1	1396	1375	6,8
2	1385	1360	16,2
3	1305	1283	1,1
4	1354	1333	8,6
5	1368	1352	11,9
6	1314	1289	4,3
7	1298	1284	6,8
8	1324	1302	5,0
9	1287	1282	7,9
10	1296	1268	18,0

Die Berechnung der Standardabweichung sieht in Tabelle 16 wie folgt aus.

Tabelle 16: Standardabweichung der optimalen Lösung für Grünzeit Kapellenstraße und Kalkerhauptstraße

Departed vehicles	Arrived vehicles	avg. Speed (Km/h)
39,8	38,6	5,3

Nach Berücksichtigung der Bedingungen für die Konfidenzintervalle konnte nur ein Ergebnis (Iteration 4) festgehalten werden. Das beste Ergebnis ist mit einem Zufluss von 1354 Kfz/h und einem Abfluss von 1333 Kfz/h bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 8,6 km/h (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Gewählte Lösung für Szenario 4

Iteration	Departed vehicles	Arrived vehicles	avg. Speed (Km/h)
4	1354	1333	8,6

4.4 Szenario 5: Einrichtung eines Kreisverkehrs als Ersatz für die Ampeln für Fahrzeuge

In diesem Szenario wurden alle Ampeln beseitigt und ein Kreisverkehr eingerichtet (Abbildung 26).

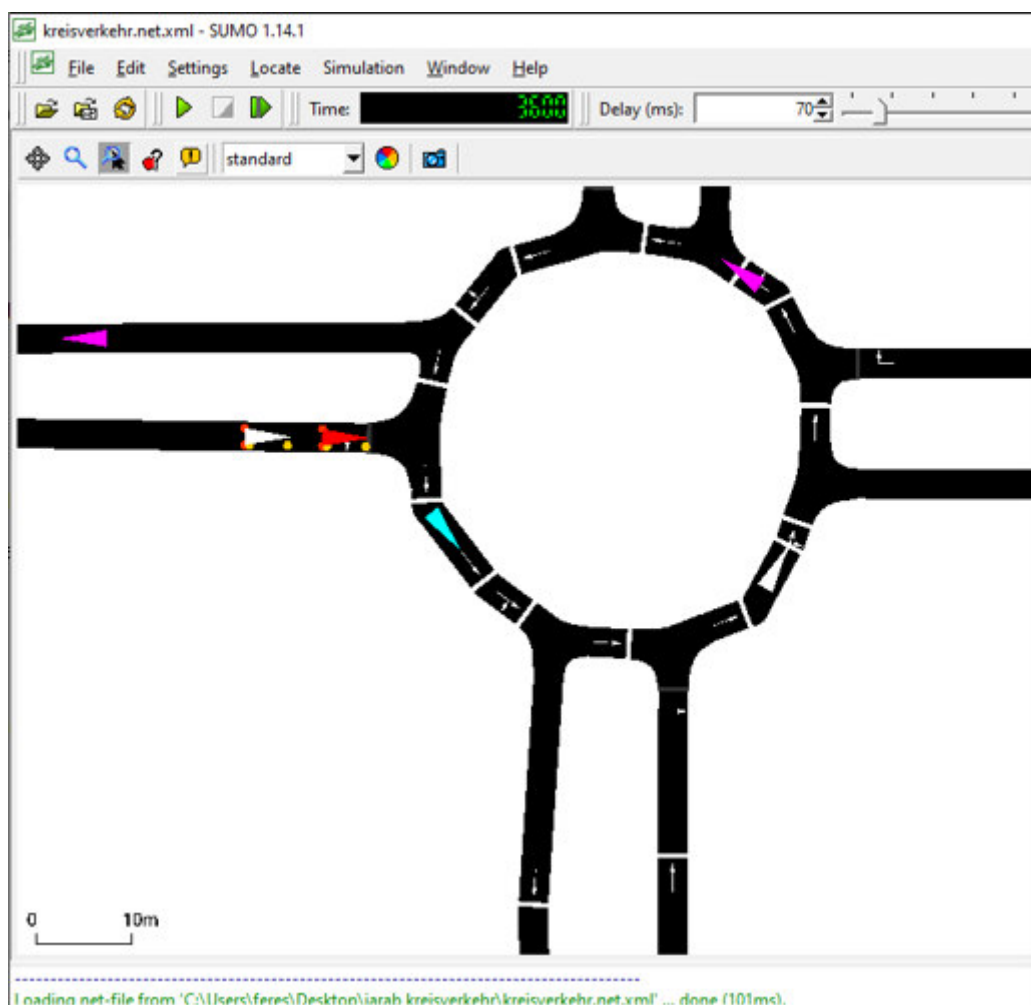


Abbildung 26: Kreuzung Kalk Kapelle in einen Kreisverkehr umgewandelt

Das Ergebnis ist bemerkenswert, da fast alle erwarteten Fahrzeuge durchgekommen sind. Die Zahl der durchgelassenen Fahrzeuge liegt bei 1520 Fahrzeugen pro Stunde.

[Analyse und Verbesserung des Straßenverkehrs an der Kreuzung Kalk Kapelle in Köln mithilfe des Simulationstools SUMO]

Da dieses Ergebnis bemerkenswert ist, wurde eine zweite Simulation in diesem Szenario durchgeführt, um zu sehen, wie viele Fahrzeuge diese Kreuzung verkraften könnte. Dabei wurde entschieden, dass der Verkehrsfluss pro Fahrbahn bei 5000 Fahrzeugen pro Stunde liegt. In Abbildung 27 ist ersichtlich, dass dieser Kreisverkehr mit diesen Parametern gesättigt ist.

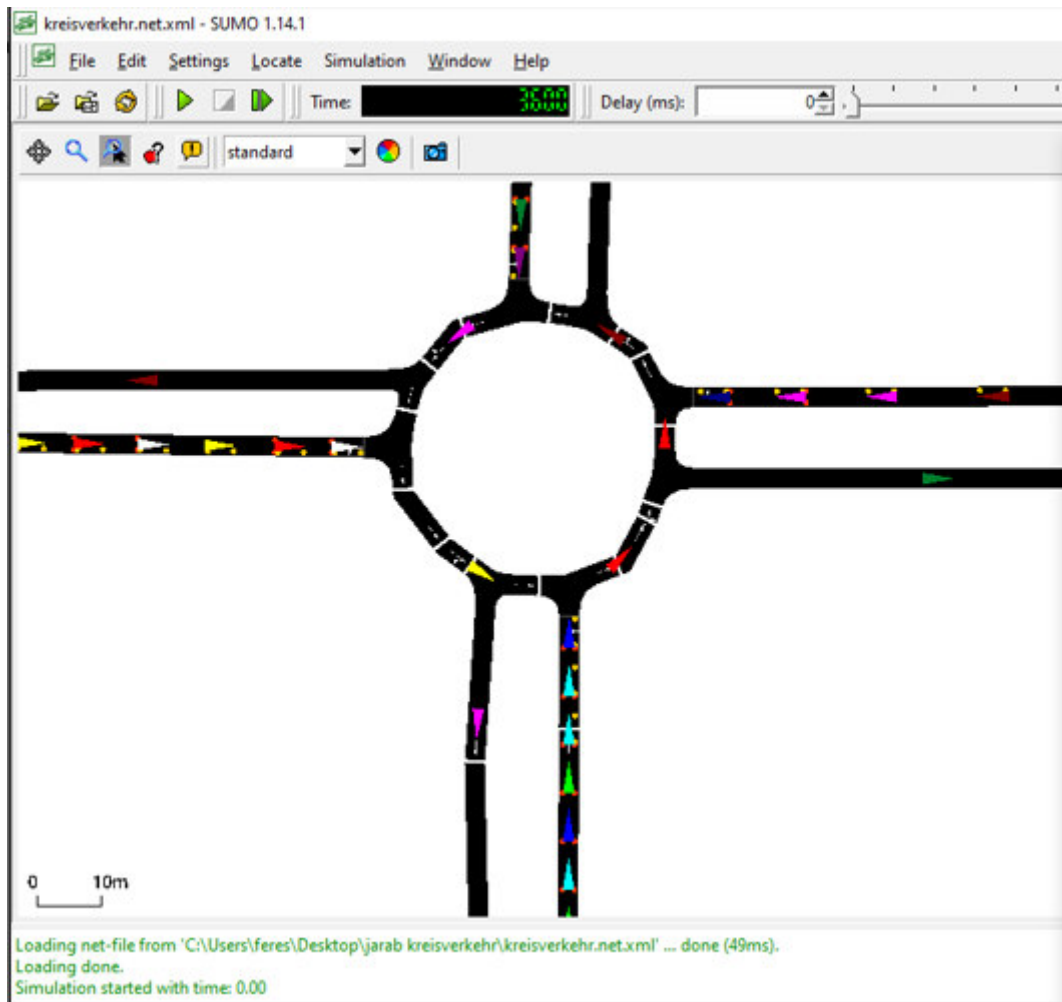


Abbildung 27: Kreisverkehr mit 5000 Kfz/Std pro Spur

Das Ergebnis lässt die Verkehrsflussgrenzen von Fahrzeugen erkennen, die die Kreuzung Kalk Kapelle mit 2366 Kfz/Std. passiert haben.

- Dieses Szenario ist für die Lösung, die später diskutiert wird, zu berücksichtigen.

4.5 Auswahl des geeigneten Szenarios

In diesem Teil werden die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien verglichen. Anschließend wird das am besten geeignete Szenario ausgewählt.

4.5.1 Zusammenfassung der Szenarien

In Tabelle 18 ist die Zusammenfassung der verschiedenen Ergebnisse von Verkehrsfluss, Durchschnittsgeschwindigkeit und Zyklusdauer für jedes Szenario dargestellt. Zur Erinnerung: Szenario 1 besteht darin, die grünen Ampeln für Fußgänger zu verschieben. Szenario 2 ist die Verlängerung der Grünphase der Ampel um 50 Sekunden für die Spuren a, b und g. Szenario 3 ist eine Verkürzung der Grünphase für die Spuren c und d um 10 Sekunden. Szenario 4 sieht vor, die Grünphase für die Spuren a, b und g um 40 Sekunden zu verlängern und die Grünphase für die Spuren c und d um 10 Sekunden zu verkürzen. Szenario 5 ist, die Ampelanlage durch einen Kreisverkehr zu ersetzen.

Tabelle 18: Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien

Szenario-Nummer	Verkehrsfluss (Kfz/h)	Durchschnittsgeschwindigkeit (km/h)	Zykluszeit (s)
1	1025	3,88	120
2	1361	16,2	140
3	1182	16,2	80
4	1333	8,6	130
5	1520	7,46	∞
IST-Zustand	1237	3,63	90

4.5.2 Entscheidung der Lösung

Nach der Analyse der verschiedenen möglichen Szenarien fiel die Wahl auf Szenario 5, da es die beste Alternative für den aktuellen Zustand darstellt, in dem Sinne, dass der Verkehrsfluss sehr stark erhöht wird, während die Durchschnittsgeschwindigkeit verdoppelt wird.

5. Fazit und Ausblick

In dieser Studie wird dieser Effekt am Beispiel der Kreuzung Kalk Kapelle in Köln gemessen.

Im Verlauf der Masterarbeit wurden mikroskopische und makroskopische Modelle verglichen und deren unterschiedliche Parameter verstanden. Die Parameter der Kreuzung wurden gesucht und getestet. Anschließend wurden fünf Szenarien simuliert, um die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen, diese zu vergleichen und eine bessere Alternative zu den Anfangsbedingungen zu wählen.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass der Einfluss von Fußgängern den Verkehrszustand negativ beeinflussen kann. In dem untersuchten Fall zeigte sich, dass die Verwendung eines Kreisverkehrs anstelle einer Ampel potenziell zu einer besseren Fähigkeit der Verkehrssteuerung für die Kreuzung führt.

Die Simulation zeigt, dass die Verwendung eines Kreisverkehrs die Kapazität der Kreuzung erhöhen könnte, aber das bedeutet nicht automatisch, dass dies die optimale Lösung ist, da andere Aspekte berücksichtigt werden müssen: zunächst die Kosten, die investiert werden müssen, und die Rendite sowie der Mehrwert, den diese Änderung bringen könnte. Die Tatsache, dass die Kapazität dieser Kreuzung erhöht wurde, bedeutet nicht automatisch, dass die anderen Kreuzungen die neuen Verkehrsflüsse auch bewältigen können. Andererseits wurde in einer der anderen Lösungen (Szenario 2) vorgeschlagen, den Zyklus der Abblendlichter von 90 Sekunden auf 140 Sekunden zu verlängern. Dies hat zwei große Nachteile: 1) Dies berücksichtigt nicht die Zyklen der anderen benachbarten Zyklen und kann sehr schnell zu Staus führen. 2) Die Wartezeit der Verkehrsteilnehmer verlängert sich so sehr, dass dies negative Auswirkungen haben kann, wie aggressives Fahren oder sogar die Missachtung der Verkehrsregeln.

Die SUMO-Software ist recht einfach und flexibel zu bedienen, kann aber nicht ohne Weiteres ein kompliziertes Netzwerk abdecken und hat einige Nachteile, die die Simulation für den Benutzer anstrengend machen können. Ein Schwachpunkt von SUMO und der Verkehrsmodellierung und -simulation im Allgemeinen wurde angesprochen, da die Einführung der Parameter Anfangsgeschwindigkeit und Anfangspositionen die Ergebnisse erheblich verändert. Dies hat zur Folge, dass nicht jede Simulation automatisch als zuverlässig und anwendbar angesehen werden kann. Es müssen mathematische Hilfsmittel verwendet wer-

[Analyse und Verbesserung des Straßenverkehrs an der Kreuzung Kalk Kapelle in Köln mithilfe des Simulationstools SUMO]

den, um die unrealistischsten Ergebnisse auszuschließen. In einem makroskopischen Kontext können Fluktuationen schwieriger zu kontrollieren sein. Ein weiterer Aspekt, der angesichts der technologischen Entwicklung in Zukunft stärker berücksichtigt werden muss, ist die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen, um Geschwindigkeiten, Bremswege und -zeiten zu regulieren. Diese Studie war sehr interessant und brachte Klarheit in den Straßenverkehr und könnte insbesondere Fahrzeugnutzern helfen, inkohärente Geschwindigkeitsbegrenzungen zu verstehen (z. B. 80 km/h auf der Autobahn A3, obwohl der Verkehr frei ist).

6. Literaturverzeichnis

- Dallmeyer, J., 2014. *Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt: Das Mit- und Gegeneinander verschiedener Verkehrsteilnehmertypen*. Wiesbaden: Springer.
- Duco W. J. Pulle, P. D. A. V., 2015. *Applied Control of Electrical Drives, Real Time Embedded and Sensorless Control using VisSim™ and PLECS™*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Eckehard Schnieder, L. S., 2013. *Verkehrssicherheit, Maße und Modelle, Methoden und Maßnahmen für den Straßen- und Schienenverkehr*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- Elefteriadou, L., 2014. *An Introduction to Traffic Flow Theory*. New York: Springer New York, NY.
- Haller, W., 2006. *Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren*. s.l.:forschungsgesellschaft für straßen- und verkehrswesen.
- Helmut Nuhn, M. H., 2006. *Verkehrsgeographie*. Paderborn ; München ; Wien ; Zürich: Schöningh.
- Holzapfel, H., 2020. *Urbanismus und Verkehr, Beitrag zu einem Paradigmenwechsel in der Mobilitätsorganisation*. Wiesbaden: Springer.
- Justiz, B. d., kein Datum *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) § 43 Verkehrseinrichtungen*. [Online] Available at: https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/_43.html
- Kerner, B. S., 2009. *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control, The Long Road to Three-Phase Traffic Theory*. Heidelberg: Springer Berlin.
- Leyn, U., 2018. *Einfluss von Instationarität auf die Wartezeit an Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Machemehl, G.-H. A. u. R. B., 1997. *Methodology for Traffic Signal Timing in Oversaturated Arterial Networks*. Texas: Center for Transportation Research.
- Maria Heide Zierer, K. Z., 2010. *Zur Zukunft der Mobilität, eine multiperspektive Analyse des Verkehrs zu Beginn des 21. Jahrhunderts*. Wiesbaden: Springer.
- Martin Treiber, A. K., 2010. *Verkehrsdynamik und -simulation Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Mathias Mitteregger, E. M. B. A. S. A. S. M. B. J. S. D. I. B., 2020. *AVENUE21. Automatisierter und vernetzter Verkehr: Entwicklungen des urbanen Europa*. Heidelberg: Springer Vieweg Berlin.
- Moltenbrey, M., 2020. *Einführung in die Verkehrssimulation*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Peter Henicke, T. K. J. R. O. R. D. S., 2021. *Nachhaltige Mobilität für alle, Ein Plädoyer für mehr Verkehrsgerechtigkeit*. Wuppertal: Oekom.
- Pilz, G., 2021. *Mobilität im 21. Jahrhundert? Frag doch einfach! Klare Antworten aus erster Hand*. s.l.:UTB.
- Prof. Dr.-Ing. Ralf Roos, D.-I. M. Z., 2012. *Entwurf und Bau von Straßen*. Karlsruhe: Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen.
- Proff, H., 2020. *Neue Dimensionen der Mobilität, Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*. Wiesbaden: 658-29746-6.

[Analyse und Verbesserung des Straßenverkehrs an der Kreuzung Kalk Kapelle in Köln mithilfe des Simulationstools SUMO]

Safety, I. I. f. H., 2000. [Online]

Available at:

<https://web.archive.org/web/20131103154450/http://www.iihs.org/externaldata/srdata/docs/sr3505.pdf>

Transportation, U. D. o., 2020. *Traffic Analysis Tools Program*. [Online]

Available at: <https://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/corsim.htm>

Transportation, U. D. o., kein Datum *Office of Operations*. [Online]

Available at: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop06006/>

Transportation, U. D. o., kein Datum *Office Of Operations*. [Online]

Available at: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08024/>

verkehrswesen, F. f. s.- u., 2012. *Baier, R. s.l.*:Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen.

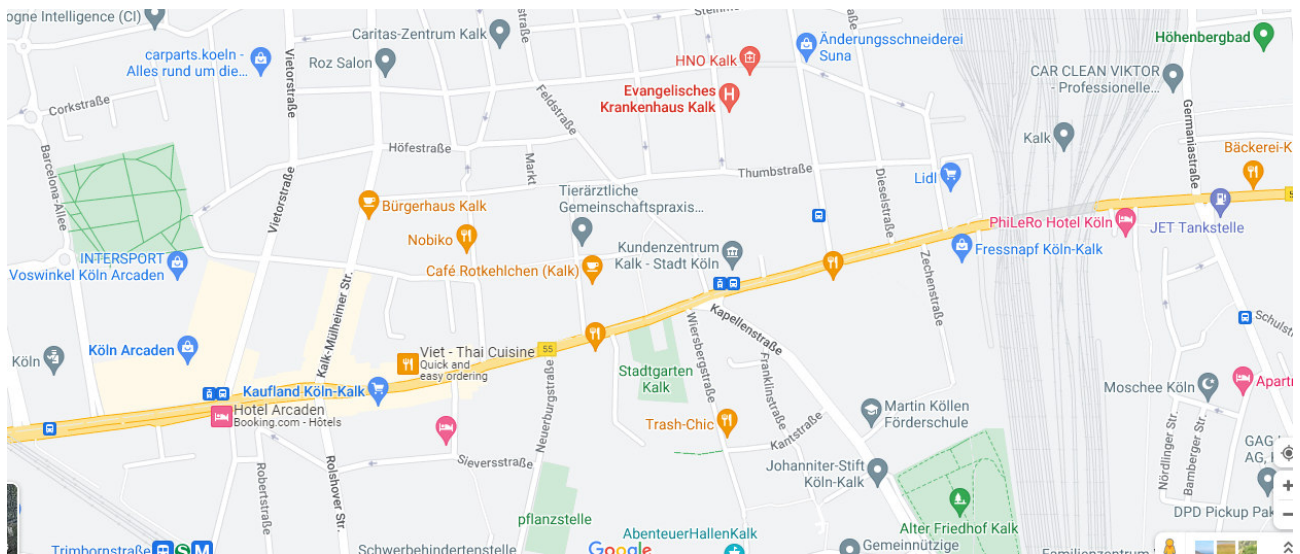
VERKEHRSWESEN, F. F. S.-. U., 2021. *Jahresbericht*, Köln: Druckerei Lutz GmbH.

Wolfgang Pietzsch, G. W., 2000. *Strassenplanung*. Düsseldorf: Werner.

A1 Bilder

[Analyse und Verbesserung des Straßenverkehrs an der Kreuzung Kalk Kapelle in Köln mithilfe des Simulationstools SUMO]

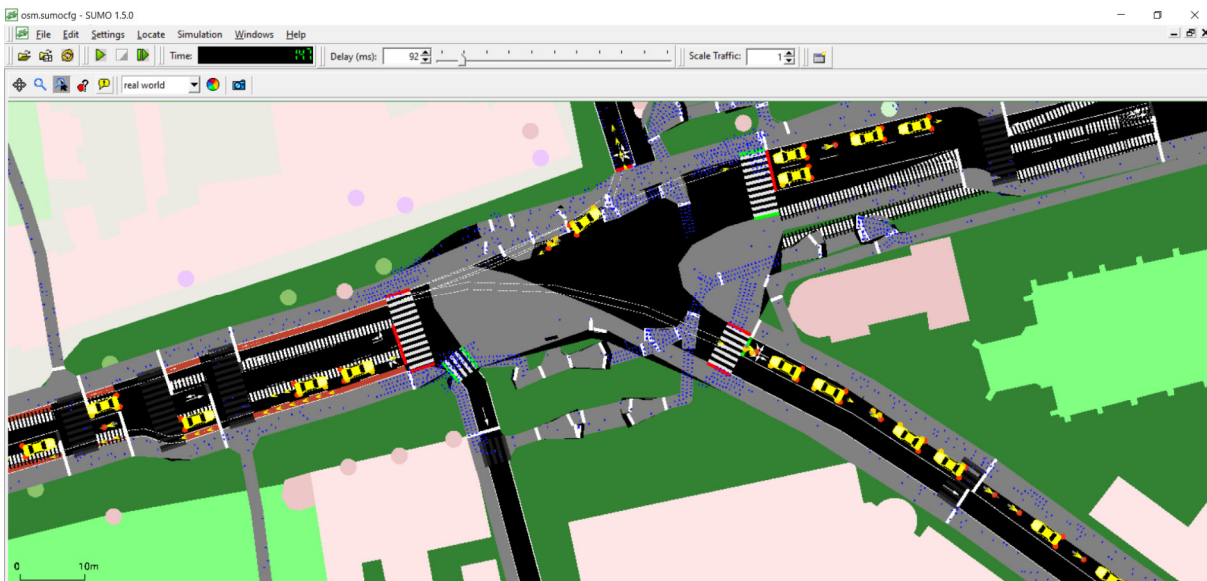
A1.1 Kalk Kapelle nach Google Maps



A1.2 Kalk Kapelle nach Open Street Map



A1.3 Kalk Kapelle nach SUMO



A2 Ergebnisse

A 2.1 Kalker Hauptstraße +60s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	102	
departed vehicles [#]	1421	
running vehicles [#]	20	
arrived vehicles [#]	1401	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	15	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	0.72	
avg. relative speed	0.14	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	220	
FPS	250.00	
simulation duration [ms]	0	
idle duration [ms]	220	
duration factor	-1.00	
updates per second	-1.00	
avg. updates per second	63098.60	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.2 Kalker Hauptstraße + 50s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	38	
departed vehicles [#]	1485	
running vehicles [#]	17	
arrived vehicles [#]	1468	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	3	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	5.51	
avg. relative speed	0.44	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	279	
FPS	200.00	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	278	
duration factor	1000.00	
updates per second	17000.00	
avg. updates per second	50543.95	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.3 Kalker Hauptstraße + 45s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	39	
departed vehicles [#]	1484	
running vehicles [#]	21	
arrived vehicles [#]	1463	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	14	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	2.68	
avg. relative speed	0.22	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	203	
FPS	250.00	
simulation duration [ms]	0	
idle duration [ms]	203	
duration factor	-1.00	
updates per second	-1.00	
avg. updates per second	64663.71	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.4 Kalker Hauptstraße + 40s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	67	
departed vehicles [#]	1456	
running vehicles [#]	23	
arrived vehicles [#]	1433	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	15	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	2.26	
avg. relative speed	0.19	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	200	
FPS	90.91	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	199	
duration factor	1000.00	
updates per second	23000.00	
avg. updates per second	58910.44	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.5 Kalker Hauptstraße + 35s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	75	
departed vehicles [#]	1448	
running vehicles [#]	20	
arrived vehicles [#]	1428	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	10	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	2.82	
avg. relative speed	0.26	
end time [s]	-1	✗
begin time [s]	0	✗
step duration [ms]	189	
FPS	250.00	
simulation duration [ms]	2	
idle duration [ms]	187	
duration factor	500.00	
updates per second	10000.00	
avg. updates per second	74682.22	
nodes [#]	137	✗
edges [#]	236	✗
total edge length [km]	9.93	✗
total lane length [km]	11.23	✗
network version	1.90	✗

A 2.6 Kalker Hauptstraße + 30s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	83	
departed vehicles [#]	1440	
running vehicles [#]	22	
arrived vehicles [#]	1418	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	16	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	1.91	
avg. relative speed	0.17	
end time [s]	-1	✗
begin time [s]	0	✗
step duration [ms]	139	
FPS	333.33	
simulation duration [ms]	0	
idle duration [ms]	139	
duration factor	-1.00	
updates per second	-1.00	
avg. updates per second	65632.28	
nodes [#]	137	✗
edges [#]	236	✗
total edge length [km]	9.93	✗
total lane length [km]	11.23	✗
network version	1.90	✗

A 2.7 Kalker Hauptstraße + 20s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	155	
departed vehicles [#]	1368	
running vehicles [#]	13	
arrived vehicles [#]	1355	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	11	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	1.19	
avg. relative speed	0.13	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	141	
FPS	250.00	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	140	
duration factor	1000.00	
updates per second	13000.00	
avg. updates per second	54090.60	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.8 Kalker Hauptstraße +10 s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	242	
departed vehicles [#]	1281	
running vehicles [#]	14	
arrived vehicles [#]	1267	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	10	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	1.77	
avg. relative speed	0.16	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	237	
FPS	333.33	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	236	
duration factor	1000.00	
updates per second	14000.00	
avg. updates per second	48183.66	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.9 Kapellenstraße +60 s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	660	
departed vehicles [#]	863	
running vehicles [#]	14	
arrived vehicles [#]	849	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	13	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	0.17	
avg. relative speed	0.06	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	249	
FPS	333.33	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	248	
duration factor	1000.00	
updates per second	14000.00	
avg. updates per second	39951.57	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.10 Kapellenstraße +50s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	631	
departed vehicles [#]	892	
running vehicles [#]	15	
arrived vehicles [#]	877	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	13	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	0.44	
avg. relative speed	0.09	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	109	
FPS	125.00	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	108	
duration factor	1000.00	
updates per second	15000.00	
avg. updates per second	39235.22	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.11 Kapellenstraße + 45s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	619	
departed vehicles [#]	904	
running vehicles [#]	14	
arrived vehicles [#]	890	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	12	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	0.21	
avg. relative speed	0.05	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	295	
FPS	333.33	
simulation duration [ms]	0	
idle duration [ms]	295	
duration factor	-1.00	
updates per second	-1.00	
avg. updates per second	42547.60	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.12 Kapellenstraße + 40s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	584	
departed vehicles [#]	939	
running vehicles [#]	18	
arrived vehicles [#]	921	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	11	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	2.06	
avg. relative speed	0.22	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	204	
FPS	250.00	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	203	
duration factor	1000.00	
updates per second	18000.00	
avg. updates per second	41740.64	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.13 Kapellenstraße + 35s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	567	
departed vehicles [#]	956	
running vehicles [#]	15	
arrived vehicles [#]	941	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	13	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	1.00	
avg. relative speed	0.11	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	254	
FPS	333.33	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	253	
duration factor	1000.00	
updates per second	15000.00	
avg. updates per second	49197.44	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.14 Kapellenstraße +30s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	530	
departed vehicles [#]	993	
running vehicles [#]	17	
arrived vehicles [#]	976	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	13	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	0.82	
avg. relative speed	0.10	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	125	
FPS	125.00	
simulation duration [ms]	2	
idle duration [ms]	123	
duration factor	500.00	
updates per second	8500.00	
avg. updates per second	51400.33	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.15 Kapellenstraße +20s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	475	
departed vehicles [#]	1048	
running vehicles [#]	15	
arrived vehicles [#]	1033	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	12	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	1.11	
avg. relative speed	0.12	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	141	
FPS	90.91	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	140	
duration factor	1000.00	
updates per second	15000.00	
avg. updates per second	44368.12	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.16 Kapellenstraße + 10s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	388	
departed vehicles [#]	1135	
running vehicles [#]	18	
arrived vehicles [#]	1117	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	10	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	1.97	
avg. relative speed	0.22	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	94	
FPS	250.00	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	93	
duration factor	1000.00	
updates per second	18000.00	
avg. updates per second	44575.89	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.17 Kapellenstraße – 10s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	276	
departed vehicles [#]	1247	
running vehicles [#]	14	
arrived vehicles [#]	1233	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	5	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	5.60	
avg. relative speed	0.45	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	159	
FPS	250.00	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	158	
duration factor	1000.00	
updates per second	14000.00	
avg. updates per second	46053.77	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.18 Kapellenstraße – 15s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	328	
departed vehicles [#]	1195	
running vehicles [#]	20	
arrived vehicles [#]	1175	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	9	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	1.70	
avg. relative speed	0.18	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	202	
FPS	100.00	
simulation duration [ms]	3	
idle duration [ms]	199	
duration factor	333.33	
updates per second	6666.67	
avg. updates per second	51034.46	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.19 Kalker Hauptstraße + 50s, Kapellenstraße – 10s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	149	
departed vehicles [#]	1374	
running vehicles [#]	21	
arrived vehicles [#]	1353	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	17	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	1.90	
avg. relative speed	0.16	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	169	
FPS	333.33	
simulation duration [ms]	0	
idle duration [ms]	169	
duration factor	-1.00	
updates per second	-1.00	
avg. updates per second	56846.76	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.20 Kalker Hauptstraße + 40s, Kapellenstraße -10s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	127	
departed vehicles [#]	1396	
running vehicles [#]	21	
arrived vehicles [#]	1375	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	17	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	1.88	
avg. relative speed	0.16	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	139	
FPS	142.86	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	138	
duration factor	1000.00	
updates per second	21000.00	
avg. updates per second	61449.46	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.21 Kalker Hauptstraße +40s, Kapellenstraße – 15s

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	127	
departed vehicles [#]	1396	
running vehicles [#]	21	
arrived vehicles [#]	1375	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	17	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	1.88	
avg. relative speed	0.16	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	139	
FPS	142.86	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	138	
duration factor	1000.00	
updates per second	21000.00	
avg. updates per second	61449.46	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.22 Kalkerhauptstraße + 50s dann alles dividiert

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1523	
insertion-backlogged vehicles [#]	149	
departed vehicles [#]	1374	
running vehicles [#]	27	
arrived vehicles [#]	1347	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	20	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	1.51	
avg. relative speed	0.14	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	157	
FPS	250.00	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	156	
duration factor	1000.00	
updates per second	27000.00	
avg. updates per second	68536.75	
nodes [#]	137	
edges [#]	236	
total edge length [km]	9.93	
total lane length [km]	11.23	
network version	1.90	

A 2.23 Kalkerhauptstraße + 50s dann alles dividiert (Zyklus)

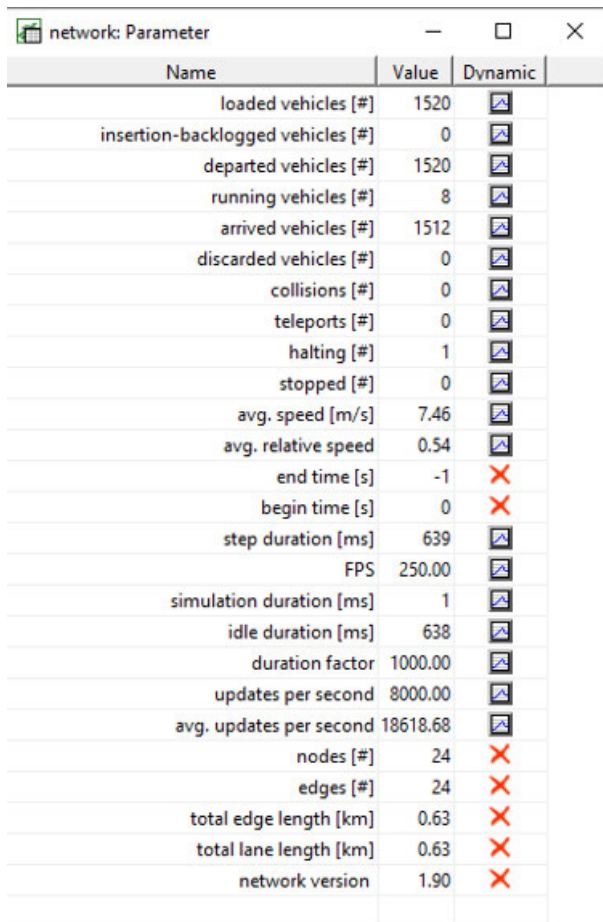
dur	min	max	state
34.00	10.00	45.00	GGGggggrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrGGGgggrrrrrr
5.00			yyyggggrrrrrrrrrrrrrrrrrrrryyygggrrrrrr
3.00			rrrGGGrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrGGGrrrrrrrr
2.00			rrryyyyrrrrrrrrrrrrrrrrrrrryyyrrrrrrrr
10.00	5.00	25.00	rrrrrrrGGGggggrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrGGGgg
13.00			rrrrrrrrrrrrrrgggggggrrrrrrrrrrrrrrrrrr
3.00			rrrrrrrrrrrrrryyyyyyrrrrrrrrrrrrrrrrrr
5.00			rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr

Cycle time: 75.00

A 2.24 Sonntag

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	645	
insertion-backlogged vehicles [#]	0	
departed vehicles [#]	645	
running vehicles [#]	3	
arrived vehicles [#]	642	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	3	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	0.00	
avg. relative speed	0.00	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	816	
FPS	333.33	
simulation duration [ms]	0	
idle duration [ms]	816	
duration factor	-1.00	
updates per second	-1.00	
avg. updates per second	20342.45	
nodes [#]	133	
edges [#]	221	
total edge length [km]	9.96	
total lane length [km]	11.97	
network version	1.90	

A 2.25 Kreisverkehr



The screenshot shows a window titled "network: Parameter" with a table of simulation statistics. The table has three columns: "Name", "Value", and "Dynamic". The "Dynamic" column contains icons: a blue square with a white arrow for dynamic parameters and a red "X" for static parameters.

Name	Value	Dynamic
loaded vehicles [#]	1520	
insertion-backlogged vehicles [#]	0	
departed vehicles [#]	1520	
running vehicles [#]	8	
arrived vehicles [#]	1512	
discarded vehicles [#]	0	
collisions [#]	0	
teleports [#]	0	
halting [#]	1	
stopped [#]	0	
avg. speed [m/s]	7.46	
avg. relative speed	0.54	
end time [s]	-1	
begin time [s]	0	
step duration [ms]	639	
FPS	250.00	
simulation duration [ms]	1	
idle duration [ms]	638	
duration factor	1000.00	
updates per second	8000.00	
avg. updates per second	18618.68	
nodes [#]	24	
edges [#]	24	
total edge length [km]	0.63	
total lane length [km]	0.63	
network version	1.90	