

# **Bachelorarbeit**

Zur Erlangung des akademischen Grades des

**Bachelor of Science (B.Sc.)**

im allgemeinen Maschinenbau

## **Bewertung und Verbesserung der Verkehrssituation mit der Hilfe von der Simulationssoftware SUMO am Beispiel Wuppertal**



Vorgelegt am Lehrstuhl Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit

der Bergischen Universität Wuppertal bei

Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux

und M.Sc. Ibrahima Ba

Soufian Estufel

1353560

Abgabedatum: 24.02.2022

# Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Stellen der Abschlussarbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

---

Datum, Unterschrift

# Inhaltsverzeichnis

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>IV</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>V</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>4</b>
2.1 Grundlagen der Verkehrstechnik .....	4
2.1.1 Verkehr .....	4
2.1.2 Verkehrsdichte .....	4
2.1.3 Verkehrsnachfrage.....	5
2.1.4 Verkehrszeichen .....	5
2.1.5 Verkehrsstau.....	5
2.1.6 Zeitlücke .....	6
2.1.7 Induktionsschleifendetektor .....	6
2.1.8 Verkehrsfluss .....	7
2.1.9 Fundamentaldiagramm .....	8
2.2 Deutsche Technische Regelwerke.....	10
2.2.1 Regelwerke für die Planung und den Bau von Straßen .....	10
2.2.2 Richtlinien für Lichtsignalanlagen und -zeichenanlagen (RiLSA) ....	11
2.3 Knotenpunkte.....	11
2.3.1 Knotenpunktarten und Formen .....	12
2.3.2 Kreuzung .....	14
2.3.3 Einmündung.....	14
2.3.4 Kreisverkehr.....	15
2.3.5 Eigenschaften von Knotenpunkten .....	16
2.4 Bypass .....	17
2.5 Umweltspuren .....	17
2.6 Lichtzeichenanlagen .....	18
2.6.1 Lichtsignalsteuerung.....	18
2.6.2 Verlustzeit .....	19
2.6.3 Übergangszeiten.....	19

2.6.4	Zwischenzeiten .....	19
2.6.5	Überfahrzeiten, Einfahrzeiten und Räumzeiten .....	20
2.6.6	Signalzeitenplan und Festzeitsteuerung .....	23
2.6.7	Verkehrssampel mit Countdown .....	24
<b>3</b>	<b>Verkehrssimulation .....</b>	<b>24</b>
3.1	Simulation .....	26
3.2	Verkehrssimulation.....	26
3.3	Modellarten .....	27
3.3.1	Mikroskopisches Modell.....	27
3.3.2	Mesoskopisches Modell.....	28
3.3.3	Makroskopisches Modell.....	28
<b>4</b>	<b>Simulationssoftware SUMO .....</b>	<b>29</b>
4.1	Simulation .....	29
4.2	Erstellung von Straßennetzen.....	30
4.3	Fahrzeuge und Routen .....	32
4.4	Netedit.....	32
4.5	OpenStreetMap OSM WEBWIZARD .....	33
4.6	Anwendungsbereiche von SUMO .....	34
4.7	Auswertungsparameter über TriplInfo.....	35
<b>5</b>	<b>Festlegung der SUMO Parameter .....</b>	<b>37</b>
5.1	Kreuzung Robert-Daum-Platz .....	37
5.2	Bestandsanalyse Kreuzung Robert-Daum-Platz.....	38
5.3	Verwendeter Datensatz für die Implementierung von SUMO.....	45
<b>6</b>	<b>Simulation und Auswertung der Verkehrssituation .....</b>	<b>47</b>
6.1	Analyse der Simulation .....	47
6.2	Computergestützte Simulationsauswertung Kreuzung.....	49
6.2.1	Vergleich der Signalpläne .....	51
6.3	Computergestützte Simulationsauswertung Kreisverkehr .....	52
6.3.1	Vergleich mit dem Kreisverkehr .....	54
6.4	Methodik .....	54
6.4.1	Verbesserung.....	56
6.4.2	Verbesserung 1.Szenario .....	57
6.4.3	Verbesserung 2.Szenario .....	60
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>65</b>

<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>67</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>73</b>
<b>10</b>	<b>Übersicht: Digitaler Anhang .....</b>	<b>79</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Induktionsschleifendetektor (Lehnhoff, 2005) .....	6
Abbildung 2: Fundamentaldiagramm (FGSV, 2005).....	8
Abbildung 3: Einordnung in das Regelwerk (FGSV, 2006).....	12
Abbildung 4: Klassisches Kleeblatt (Engelmann, 2020) .....	13
Abbildung 5: Kreuzung (Herbst, 2021) .....	14
Abbildung 6: Einmündung (Herbst, 2021) .....	14
Abbildung 7: Kreisverkehr (ADAC, 2002) .....	15
Abbildung 8: Umweltpur (Radio91.2, 2021).....	17
Abbildung 9: Ampelsystem in allen Phasen (Central, 2021).....	18
Abbildung 10: Bsp. Zwischenzeitmatrix eines Knotenpunkts (FGSV, 2015) .....	20
Abbildung 11: Prinzipskizze zum Beispiel der Zwischenzeitberechnung (Krimmling, 2017) .....	21
Abbildung 12: Beispiel für ein Signalzeitenplan mit 4 Signalgruppen (Krimmling, 2017)..	23
Abbildung 13: Countdown Ampel (Rehder, 2019) .....	24
Abbildung 14: Modellarten (eigene Darstellung).....	27
Abbildung 15: Beispiele für abstrakte Straßennetze mit „Netgenerien“ (Krajzewicz, 2012) .....	31
Abbildung 16: Netzbereitungsverfahren in Netconvert und Netgenerate (Krajzewicz, 2012).....	32
Abbildung 17: OSM Webwizard Robert-Daum-Platz (SUMO, 2021) .....	33
Abbildung 18: Lageplan Robert-Daum-Platz (Stadt Wuppertal) .....	37
Abbildung 19: Vergrößerte Ansicht des Lageplans zur Veranschaulichung der betroffenen Straßen (Stadt Wuppertal) .....	40
Abbildung 20: Signalplan SiPI 17, 6:00 Uhr – 8:25 Uhr (Stadt Wuppertal).....	43
Abbildung 21: Signalplan SiPI 18, Schaltung 14:00 Uhr - 20:00 Uhr (Stadt Wuppertal)...	44
Abbildung 22: Übergangszeit rot-gelb .....	44
Abbildung 23: Übergangszeit gelb .....	44
Abbildung 24: Zwischenzeitmatrix Robert-Daum-Platz (Stadt Wuppertal) .....	45
Abbildung 25: Straßennetzerstellung über SUMO am Robert-Daum-Platz (eigene Darstellung).....	46
Abbildung 26: Simulationsdarstellung Robert-Daum-Platz (SUMO, eigene Darstellung). 49	
Abbildung 27: Kreisverkehr am Robert-Daum-Platz mit 2 Spuren.....	52
Abbildung 28: Alle Szenarien .....	64

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswertungsparameter (Eclipse Foundation Inc., 2021).....	35
Tabelle 2: Realdaten.....	39
Tabelle 3: Spitzenzeitbelastung pro Signalgruppe innerhalb 1 Std.....	41
Tabelle 4: Auswertung 1.Szenario mit 2.797 Fahrzeugen und SiPI 17 .....	50
Tabelle 5: Auswertung 2.Szenario mit 3.845 Fahrzeugen und SiPI 18 .....	51
Tabelle 6: 3.Szenario Kreisverkehr mit 2.797 Fahrzeugen .....	53
Tabelle 7: 4.Szenario Kreisverkehr mit 3.845 Fahrzeugen .....	53
Tabelle 8: 1.Szenario erste Verbesserung .....	58
Tabelle 9: 1.Szenario zweite Verbesserung .....	59
Tabelle 10: 1.Szenario dritte Verbesserung .....	60
Tabelle 11: 2.Szenario erste Verbesserung .....	61
Tabelle 12: 2.Szenario zweite Verbesserung .....	62
Tabelle 13: 2.Szenario dritte Verbesserung .....	63

Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Einheit</b>
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club	
B7	Bundesstraße 7	
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen	
LSA	Lichtsignalanlagen	
LZA	Lichtzeichenanlagen	
OSM	OpenStreetMap	
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr	
RAA	Richtlinien für die Anlage von Autobahnen	
RAL	Richtlinien für die Anlage von Landstraßen	
RASt	Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen	
RiLSA	Richtlinien für Lichtsignalanlagen	
StVO	Straßenverkehrsordnung	
SUMO	Simulation of Urban Mobility	
VwV	Verwaltungsvorschrift	
$l_k$	Fahrzeuglänge	
$t_e$	Einfahrzeit	Sekunde
$t_G$	Übergangszeit	Sekunde
$t_r$	Räumzeit	Sekunde
$t_z$	Zwischenzeiten	Sekunde
$t_{\bar{u}}$	Überfahrzeit	Sekunde
$t_T$	Räumzeit	Sekunde
$s_r$	Räumweg	Meter
$v_r$	Räumgeschwindigkeit	Meter/Sekunde

# 1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit stellt einen Ansatz zur simulativen Optimierung einer stark befahrenen, Wuppertaler Kreuzung dar. Im Fokus der Untersuchung stehen dabei die Bewertung und Verbesserung der Verkehrssituation am Robert-Daum-Platz mittels der Simulationssoftware „Simulation of Urban Mobility“ (SUMO), die zur innerstädtischen Verkehrssimulation verwendet wird (Eclipse Foundation Inc.) . Nach der Einleitung werden zunächst die Grundlagen und der Stand der Technik erläutert, ebenfalls wird die Ausgangssituation im Rahmen der Problemstellung vorgestellt. Zum einheitlichen Verständnis der für die Thesis relevanten Fachwörter und zum Aufbau von Grundwissen für Leser außerhalb des Fachgebiets Verkehrssicherheit werden fachspezifische Begriffe erläutert. Im Anschluss beginnt die Darstellung der Methodik. Zur Simulation des Verkehrs wird mit SUMO gearbeitet, unter Verwendung von Realdaten aus dem Jahre 2018 der Stadt Wuppertal für die oben genannte Kreuzung, um eine mögliche Verbesserung der Verkehrslage zu schaffen. Im Schlussteil werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick gewährt, der dazu beitragen soll, in Zukunft einen besseren und sichereren Verkehrsfluss zu gewährleisten.

## 1.1 Problemstellung

Das sich stetig weiterentwickelnde Umfeld der Verkehrsplanung sowie die damit einhergehenden Veränderungen, von Trampelpfaden der ersten Menschen, gepflasterten Wegen, hin zu komplexen Verkehrsnetzen, entwickelten neue Rahmenbedingungen und modifizierten sie durch die Erarbeitung verbesserter sowie sicherer Verkehrsmodelle. Im Durchschnitt ist jeder deutsche Bürger bis zu 15.000 km im Jahr mobil unterwegs (Füsser, 1997).

Am 01. Januar 2021 erreichte die Anzahl der in der Bundesrepublik gemeldeten Pkw einen neuen Höchstwert von 48,25 Millionen Fahrzeugen, auch der Bestand an Krafträdern stieg seit 2008 auf 4,66 Millionen zugelassener Kraftradfahrzeuge und die Anzahl der LKW auf 3,41 Millionen (Kraftfahrt-Bundesamt, 2021). Eine ähnliche Entwicklung ist auch bei dem Bestand von Fahrrädern und E-Bikes beobachtbar (Zweirad-Industrie-Verband, 2021).

Durch ständig steigende Verkehrsteilnehmer auf den Straßen entstehen an manchen Knotenpunkten diverse Probleme, welche in der vorangegangenen Verkehrslage reibungslos verliefen. Knotenpunkte können beispielsweise verschiedene Konstellationen von Kreuzungen, Kreisverkehren und Verkehrspunkten mit und ohne Lichtsignalanlagen sein. Zu den Problemen, die an Knotenpunkten entstehen können, gehört unter anderem Stau, welcher zu Zeitverlust, höherem Kraftstoffverbrauch und zur Erhöhung der Umweltbelastungen führt. Um diese Problematik auf ein Minimum zu reduzieren, kann anhand von moderner Simulationssoftware, die Situation analysiert und ausgewertet werden. Solche Simulationsmodelle dienen als Entscheidungshilfe für die Verkehrsplanung. Der Vorteil gegenüber realen Untersuchungen liegt darin, dass die Simulation preisgünstig und ohne große Verluste durchgeführt werden kann. Weiterhin lassen sich ohne hohen Aufwand verschiedene Ausgangssituationen realitätsnah darstellen und vergleichen (Dallmeyer, 2014).

Es gilt im Hinblick auf die Notwendigkeit verbesserter Verkehrsmodelle zu erforschen welche Möglichkeiten und Trends sich anbieten, um ausgewählte Knotenpunkte zu ändern, damit sich die Verkehrssituation um die Knotenpunkte insgesamt verbessert.

## **1.2 Zielsetzung**

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll die Verkehrssituation der städtischen Kreuzung Robert-Daum-Platz in Wuppertal mittels der Simulationssoftware SUMO analysiert und bewertet werden. Dabei werden nach Unregelmäßigkeiten und nach Detektoren gesucht, die einen höheren Zeitverlust als die übrigen Detektoren aufweisen. Dadurch entsteht die Zielsetzung der Thesis, den Gesamtzeitverlust an der Kreuzung zu reduzieren, indem die Engpässe identifiziert und an den Verkehrsfluss der Kreuzung Robert-Daum-Platz angepasst werden sollen. Der betrachtete Hauptansatz in dieser Thesis ist die Ampelsteuerung. Die Lichtsignaldauer soll über die Simulation SUMO zeitlich verändert werden, um den Halteverlauf der Verkehrsströme zu minimalisieren und eine Verbesserung des Verkehrsflusses zu bewirken.

Auf Nachfrage bei der Abteilung für Verkehrstechnik der Stadt Wuppertal wurden Verkehrsdaten und Informationen zur untersuchenden Kreuzung am Robert-Daum-

Platz für meine Thesis zur Verbesserung der Verkehrslage übermittelt. Diese Daten umfassten Zeichnungen, einen Lageplan und weitere Verkehrsdaten wie Verkehrszählungen und Signalpläne der Ampelanlagen. Die von der Stadt Wuppertal in Auftrag gegebene Verkehrszählung im Jahr 2018 wurde über drei Tage für je 24 Stunden durchgeführt. Die Daten sind mithilfe von Induktionsschleifen in einem 15 Minuten Takt gemessen worden. Die Induktionsschleifen sind Messinstrumente, die unter der Fahrspur angebracht werden. Diese Parameter werden dazu verwendet, um eine realitätsnahe Ausgangssituation für die Analyse herbeizuführen. Die zur Verfügung gestellten Verkehrsdaten der Stadt Wuppertal sollen in SUMO anschließend modifiziert werden, um verschiedene Szenarien zu erzeugen, die daraufhin miteinander verglichen werden sollen. Daraus sollen Erkenntnisse zum Verkehrsablauf und zur Verkehrssicherheit gewonnen werden. Kennzahlen der Analyse über SUMO sind beispielsweise Zeitverluste pro Fahrzeug je Fahrspur. Diese Werte können anschließend für eine mögliche Reduzierung des Zeitverlustes für die Verkehrsteilnehmer sowie gegen eine Gefahr von Staubildung angewendet werden. Dies soll weiterhin zu einer umweltfreundlicheren Verkehrssituation führen. Die zu untersuchende Forschungsfrage dieser Thesis lautet unter diesen Annahmen:

**„Ist eine Verbesserung der Verkehrssituation der Kreuzung Robert-Daum-Platz mit der Simulationssoftware SUMO möglich?“**

## **2 Stand der Technik**

In diesem Kapitel werden zunächst im Grundlagenteil Fachbegriffe aus dem Verkehrswesen erläutert. Nachdem ein einheitliches Begriffsverständnis vermittelt worden ist, wird anschließend ein Überblick auf den aktuellen Stand der Technik präsentiert. Dieser wird aus relevanten Regelwerken abgeleitet, die das aktuelle Verkehrswesen abbilden. Daraufhin werden verschiedene Knotenpunktarten und anschließend Lichtsignalanlagen erläutert, dabei wird nach Form und Funktion differenziert. Dies ist notwendig, da in der späteren Simulation mit SUMO die in diesem Kapitel beschriebenen Parameter modifiziert werden.

### **2.1 Grundlagen der Verkehrstechnik**

Die folgenden Unterkapitel fokussieren sich auf die Erklärungen von essenziellen Grund- und Fachbegriffen rund um den Verkehr. Diese dienen zum besseren Verständnis der weiteren Ausarbeitung.

#### **2.1.1 Verkehr**

Allgemein wird unter Verkehr die örtliche Änderung von Personen und Gütern über verschiedene Verkehrssysteme, wie z.B. den Straßenverkehr oder auch Güterverkehr verstanden. Er beschreibt also die Summe der Ortsveränderungen von Menschen und transportierten Waren (Gertz, 2021).

#### **2.1.2 Verkehrsdichte**

Durch die in der Einführung beschriebene Problematik steigender Teilnehmer im Verkehr, die im vergangenen Jahr erneut Höchstwerte erreichte, verdichtet sich der Verkehr insbesondere in Verkehrs-Hotspots.

Die Verkehrsdichte ist eine Kennzahl in der Verkehrsplanung und dient zur Beurteilung von Qualität, Leistungsfähigkeit und Sicherheit des Verkehrsablaufs. Sie ist Grundlage für eine verkehrstechnische Dimensionierung und bezeichnet die Anzahl der Verkehrselemente eines Verkehrsstromes je Wegeinheit zu einem Zeitpunkt. Die Verkehrsdichte besitzt dabei einen erheblichen Einfluss auf den Verkehrsablauf, denn sie beeinflusst das Fahrverhalten über die Geschwindigkeit,

da zum vorausfahrenden Fahrzeug ein ausreichender Sicherheitsabstand einzuhalten ist (Höfler, 2006). Die Verkehrsdichte lässt sich durch den Ausbau bestehender Verkehrsknotenpunkte wie z.B. den Ausbau an der für diese Arbeit untersuchten Kreuzung reduzieren. Infolgedessen verbessert sich die Qualität des Verkehrsablaufs (Gertz, 2021).

### **2.1.3 Verkehrsnachfrage**

Die Verkehrsnachfrage ist die Grundlage für die Bestimmung der Größe der Straßenverkehrsanlagen. Bei dieser klassischen Betrachtungsweise geht es in ihrer Auslegung darum, die Verkehrsanlage so zu dimensionieren, dass sie den geforderten Verkehr mit ausreichender Verkehrsqualität bewältigen kann. Im Idealfall stammt diese Verkehrsnachfrage aus Modellvorhersagen beziehungsweise einer sehr umfassenden Verkehrsplanung. Auf der anderen Seite stehen angebotsorientierte Dimensionierungen. Erstellt wird ein Transportsystem mit bestimmter Kapazität, ohne die Verkehrsnachfrage zu kennen. Dies kann mit bewusster Verkleinerung (z.B. Straßenverkehrsanlagen in Großstädten) oder Überdimensionierung (z.B. öffentlicher Verkehr) zur Steigerung der Attraktivität einhergehen (Goodwin, 2003).

### **2.1.4 Verkehrszeichen**

Verkehrszeichen sind dafür da, den Verkehr zu regeln sowie einen sicheren Ablauf für alle Verkehrsteilnehmer zu gewähren. Sie werden von Behörden festgelegt und müssen von jedem, der am Verkehr teilnimmt, beachtet werden. Denn sie sind – mit über 400 verschiedenen Verkehrszeichen deutschlandweit - einer der wichtigsten Bestandteile des Straßenverkehrs überhaupt. Dabei machen Gefahrzeichen auf Gefahrenstellen aufmerksam, Richtzeichen geben spezielle Hinweise und Vorschriftzeichen müssen während der Fahrt deutlich sichtbar sein (ADAC, 2021).

### **2.1.5 Verkehrsstau**

Das nacheinander stattfindende Ansammeln von Fahrzeugen bildet eine lange Reihe von Teilnehmern, dadurch wird der Straßenverkehr behindert und es kann zu einem Stillstand kommen. „Stau im Sinne der Verkehrsinformation ergibt sich, wenn

auf Hochleistungsstrassen oder Hauptstrassen ausserorts die stark reduzierte Fahrzeuggeschwindigkeit während mindestens einer Minute unter 10 km/h liegt und es häufig zum Stillstand kommt“ (Astra, 2021).

### 2.1.6 Zeitlücke

Gemäß § 4 der Straßenverkehrsordnung gilt: „Der Abstand von einem vorausfahrenden Fahrzeug muss in der Regel so groß sein, dass auch dann hinter ihm gehalten werden kann, wenn es plötzlich gebremst wird“ (StVO, 2013).

Die Zeitlücke ist der zeitliche Abstand zwischen zwei nacheinander folgenden Fahrzeugen an einem lokalen Querschnitt. Unterschieden wird unter Bruttozeitlücke, welche die Distanz zwischen der jeweils vordersten Stelle zweier Fahrzeuge beschreibt, und der Nettozeitlücke, diese beschreibt den zeitlichen Abstand zwischen Endpunkt des ersten und Anfangspunkt des folgenden Fahrzeugs. Für die Verkehrssicherheit ist das Abstandverhalten ein wichtiger Faktor (Maier, et al., 2012).

### 2.1.7 Induktionsschleifendetektor

Induktionsschleifendetektoren dienen grundsätzlich zur Verkehrsmessung. Diese sind durch verlegte Drahtschleifen in der Fahrspur installiert und stellen ein Magnetfeld dar. Durch das Überfahren des Detektors mit einem metallischen Fahrzeug wird das Signal gestört. Anhand der dadurch entstandenen Induktionsänderung kann das überquerende Fahrzeug klassifiziert werden (BÜTLER, et al., 2010). In Abbildung 1 ist dieser Zustand dargestellt.

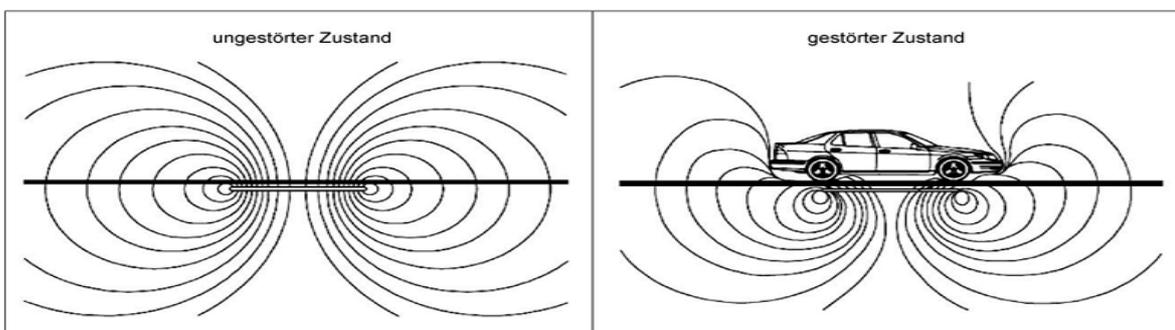


Abbildung 1: Induktionsschleifendetektor (Lehnhoff, 2005)

Diese Änderung wird durch den Schleifendetektor ausgewertet und als Schaltsignal über Relaiskontakte wiedergegeben. Anschließend werden durch den

Mikrocontroller die verursachten Schleifensignale ausgewertet und als Verkehrsdaten registriert (Lehnhoff, 2005).

### 2.1.8 Verkehrsfluss

Der Verkehrsfluss "Q" beschreibt die Fortbewegung einzelner Fahrzeuge (Dieter Lohse, 2011). Die Variable "  $\Delta N$  " ist die Anzahl der Fahrzeuge bezogen auf einen bestimmten Straßensektor x, innerhalb eines Zeitintervalls  $\Delta t$ . Die Gleichung 1.1 definiert den Verkehrsfluss (Treiber, et al., 2010):

$$Q(x, t) = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (1.1)$$

$Q(x,t)$  : Verkehrsfluss

$\Delta N$  : Anzahl der Fahrzeuge

$\Delta t$  : Straßenabschnitt pro Zeiteinheit

Weiter ist der Verkehrsfluss im Straßenverkehr als Ausnutzung der Verkehrswege durch den fahrenden Verkehr definiert. Das bedeutet, dass bei höheren Geschwindigkeiten anfangs eine Zunahme des Verkehrsflusses zu beobachten ist, dieser kann durch Hindernisse aufgrund von Geschwindigkeitsunterschieden der Fahrzeuge wieder abnehmen. Verkehrsflüsse werden in drei verschiedenen Zuständen variiert.

#### **Freier Verkehr:**

Bei diesem Zustand können die Fahrer frei über ihre Geschwindigkeit und ein mögliches Überholmanöver entscheiden. Andere Verkehrsteilnehmer werden innerhalb dieser Entscheidung nicht berücksichtigt, was die Freiheit zulässt.

#### **Freier und gestauter Verkehr:**

Durch ein höheres Verkehrsaufkommen ist die durchschnittliche Geschwindigkeit entsprechend geringer. Dieses führt zu einem teilweise eingeschränkteren Verkehrsfluss, weil die Entscheidung über die Geschwindigkeit und das Überholen für alle Beteiligten eingeschränkt ist.

#### **Gestauter Verkehr:**

Dieser Zustand beschreibt den blockierten Verkehr, welcher eine niedrigere Geschwindigkeit und ein pendelndes Verkehrsaufkommen aufweist. Der überlastete Verkehr kennzeichnet sich durch eine niedrigere Geschwindigkeit und

sehr niedriges Verkehrsaufkommen. Der stationäre Verkehr weist dagegen, eine freie Geschwindigkeit und ein sehr geringes Verkehrsaufkommen auf. Die Durchschnittsgeschwindigkeit und das Verkehrsaufkommen sind bei einer hohen Verkehrsdichte gering (Treiber, et al., 2010).

### 2.1.9 Fundamentaldiagramm

Das Fundamentaldiagramm ist „dreidimensionale Punktvolke“ (FGSV, 2004). Dieses wird über ein zweidimensionales Koordinatensystem in den drei Diagrammen dargestellt. Diese umfassen das q-v-Diagramm, das q-k-Diagramm und das k-v-Diagramm.

Die funktionale Abhängigkeit der drei genannten Kennzahlen beschreibt unterschiedliche Qualitäten des Verkehrsablaufs (FGSV, 2004).

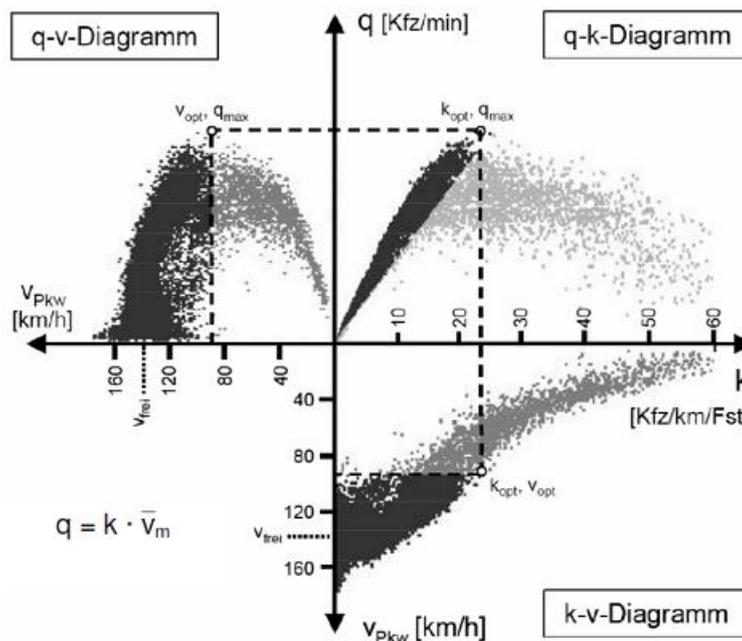


Abbildung 2: Fundamentaldiagramm (FGSV, 2005)

Mithilfe der im Fundamentaldiagramm entstehenden Form lassen sich einige Erkenntnisse über den Verkehrsablauf gewinnen. Die fundamentalen Beziehungen sind auf die Studie von (Greenshields, 1935) zurückzuführen, welche einen linearen Zusammenhang zwischen der Verkehrsdichte  $k$  und der Geschwindigkeit  $v$  durch fotografische Methoden vermittelt. Der Zusammenhang zwischen den Parametern Verkehrsstärke  $q$  und Geschwindigkeit  $v$  weist einen quadratischen

Zusammenhang und damit einen stetigen Charakter auf. Mit zunehmender Verkehrsdichte nimmt die Punktwolke immer mehr ab. Diese Einbrüche in der Grafik zeigen, dass der Verkehrsfluss weitgehend von der Verkehrsdichte abhängt. Dabei ist der Unterschied zwischen einer stabilen und instabilen Position schwer zu erkennen. Die optimale Geschwindigkeit  $v_{opt}$  und die optimale Verkehrsdichte  $k_{opt}$  liegen beide innerhalb des maximalen Verkehrsdichtebereichs  $k_{opt}$ . Die vorgestellten Kenngrößen können lokal oder auch momentan ermittelt werden. Die Kapazität  $q_{max}$  kann dadurch abgelesen werden.

Die Form des Fundamentaldiagramms wird durch die Voraussetzungen:

- Wunschgeschwindigkeit  $v_{frei}$
- maximale Verkehrsstärke  $q_{max}$  und ihre Verkehrsdichte  $k_{opt}$
- maximale Verkehrsdichte im stehenden Verkehr  $k_{max}$

eindeutig vorgegeben (WU, 2000).

So ist beispielsweise zu erkennen, dass im q-k-Diagramm zwei verschiedene Geschwindigkeiten der gleichen Verkehrsstärke zugerechnet werden. Der Punkt der maximalen Verkehrsstärke  $q_{max}$  und der optimalen Verkehrsdichte  $k_{opt}$  trennt den Bereich Wunschgeschwindigkeit  $v_{frei}$  bei geringen Verkehrsdichten und den Bereich mit eingeschränkten geringen Geschwindigkeiten und hohen Verkehrsdichten ab vom Bereich mit eingeschränkten niedrigen Geschwindigkeiten und hohen Verkehrsdichten. Dabei wird der Bereich links in der Grafik des Übergangs als freier, stabiler oder fließender Verkehr beschrieben, der rechte Bereich dagegen als instabiler gebundener oder gestauter Verkehr (Fellendorf, 2009). Im K-v Diagramm sind die stabilen und instabilen Zustände nicht so einfach zu unterscheiden. Der Wechsel vom stabilen in den instabilen Bereich kann als Sprung „capacity drop“ gesehen werden. Capacity drop ist das Ereignis, welches eine höhere Kapazität im freien Verkehr als im gestauten Bereich beschreibt (Brilon, 2005). Im Fundamentaldiagramm können noch weitere Zustandsformen des Verkehrsflusses unterschieden werden (FGSV, 2004).

## **2.2 Deutsche Technische Regelwerke**

Die Regelwerke werden von Experten aus Wissenschaft und Forschung der Forschungsgesellschaft für Straße und Verkehr (FGSV) entwickelt. Diese Arbeit bezieht sich hauptsächlich auf die RASSt- und RiLSA-Vorschriften, also auf die Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen, sowie für die Lichtsignal- und Zeichenanlagen. In den nachfolgenden beiden Unterpunkten werden diese genauer erläutert.

### **2.2.1 Regelwerke für die Planung und den Bau von Straßen**

Das Verkehrsstraßennetz wird in die Typen Autobahn, Landstraße und Stadtstraße sowie nach dem Merkmal innerhalb und außerhalb bebauter Gebiete geordnet (FGSV, 2008). Insgesamt gibt es für die Konzeption von Straßen drei elementare Regelwerke:

- Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA)
- Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL)
- Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASSt)

Thematisiert werden innerhalb der Regelwerke die Grundsätze für die Konzeptionierung und Planung neuer Straßen sowie die Instandhaltung, Veränderung und die Erweiterung bestehender Straßen. Anhand der Regelwerke lassen sich Handlungsspielräume für Entwürfe ableiten. Bei den Richtlinien für Autobahnen und Landstraßen etwa werden Entwurfsklassen definiert. Die Entwurfsklassen ordnen Einsatzorte gemäß geeigneter Entwurfselemente an. Dazu zählen die Linienführung in Lage und Höhe, die Art der Knotenpunkte und der Querschnitt der Straße. Für die innerstädtischen Straßen gelten die Richtlinien für die Stadtstraßen, die sichere Durchführung von Kraftfahrzeug-Verkehr, ÖPNV, Fahrradfahrern und Fußgängern bedingt eine gesamte Ansicht des Straßengebiets. Zu den Regelwerken existieren noch weitere Empfehlungen und Hinweise zum Entwurf einzelner Komponenten des Bauwerks Straßen. Das Merkblatt für die Anlagen von Kreisverkehren verfügt über ausführliche Hinweise zur Anwendung von Knotenpunktformen innerorts sowie außerorts. (Bay. Staatsministerium)

Für den Untersuchungsgegenstand ist die Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen (RASt) am bedeutsamsten, da die zu untersuchende Kreuzung innerhalb eines bebauten Gebiets innerstädtische Straßen miteinander verknüpft.

### **2.2.2 Richtlinien für Lichtsignalanlagen und -zeichenanlagen (RiLSA)**

Die grundlegenden verkehrstechnischen Bestimmungen und Empfehlungen für die Einrichtungen sind in der RiLSA enthalten, ebenso wie der Betrieb von Lichtzeichenanlagen (LZA). Im Straßenverkehr sind die Lichtsignalanlagen (LSA) oder auch in den Straßenverkehrlichen Vorschriften Lichtzeichenanlagen nach § 43 Absatz 1 StVO Verkehrseinrichtungen. Anwendung finden diese im Straßenverkehr bei Anordnungen, Betrieb und Planungen, sowie beim Bau von neuen Lichtsignalanlagen. Ebenso gelten diese bei allen sicherheitsrelevanten Änderungen der Lichtsignalanlagen im bestehenden Straßennetz.

Um die Anforderungen und die Ordnung des Straßenverkehrs zu gewährleisten, sollen die Richtlinien dazu beitragen, dass die Lichtanlagen technisch einwandfrei geplant, erhalten und hergestellt werden. Diese müssen allen Anforderungen des Verkehrs genügen, um die Sicherheit für alle Verkehrsteilnehmer zu garantieren.

Die neue RiLSA umfassen weitere Aussagen, die zur Konkretisierung von Rechtsnormen dienen. Diese gelten insbesondere für die Vorschriften der Straßenverkehrsordnung (StVO) und der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrsordnung (VwV-StVO) (FGSV, 2015).

## **2.3 Knotenpunkte**

Knotenpunkte sind die Verbindungsstellen der Verkehrswege in einem Straßennetz. Sie sollen leistungsfähig, effizient, umweltschonend, wirtschaftlich, sicher sowie gut geschaltet sein. Von großer Wichtigkeit ist dabei die Verkehrssicherheit, die voraussetzt, dass Knotenpunkte (FGSV, 2006):

- frühzeitig als solche erkennbar,
- überschaubar,
- verstehbar
- und passierbar sind

Für die Wahl eines geeigneten Knotenpunktes sind die Richtlinien bei der Verbindung von Straßen entscheidend (siehe Abbildung 3). Die Abwägung ist abhängig von der Umgebung, der Verkehrsgröße, den Besonderheiten wirtschaftlicher Aspekte und städtebaulichen Richtlinien (FGSV, 2006).

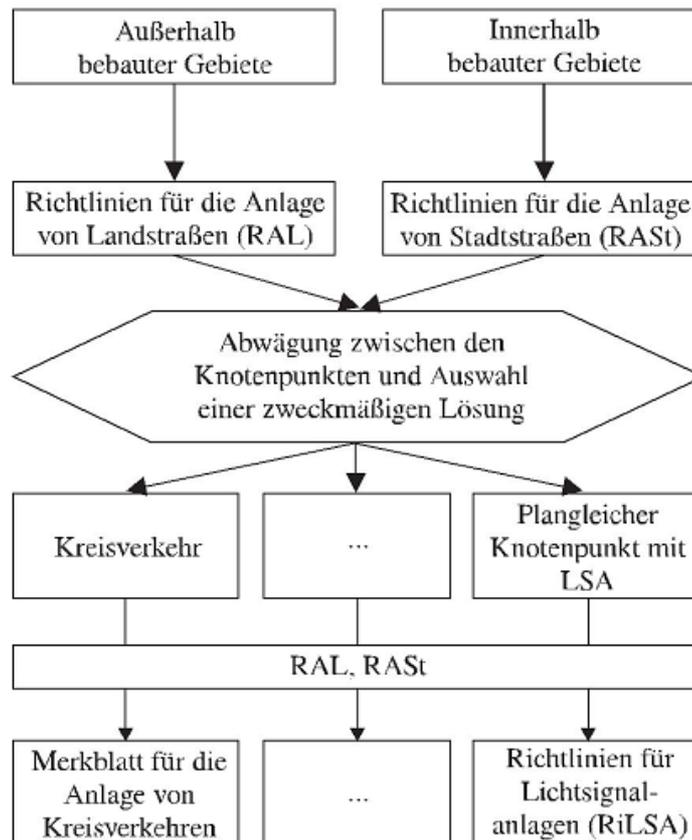


Abbildung 3: Einordnung in das Regelwerk (FGSV, 2006)

### 2.3.1 Knotenpunktarten und Formen

Die Knotenpunktsysteme und die dazugehörigen Knotenpunktbausteine werden für Landstraßen nach den RAL im FGSV und für Stadtstraßen nach RASt aufgestellt. Die Knotenpunktarten werden in Abhängigkeit von den Entwurfsklassen und den Verkehrsstärken der kreuzenden Straßen bestimmt (Gertz, 2021).

Die Grundform unterscheidet sich im Allgemeinen in zwei Punkten:

- plangleiche Knotenpunkte
- planfreie Knotenpunkte

**Plangleiche Knotenpunkte** sind Straßenverbindungen gleicher Art, die sich kreuzen und grundsätzlich in städtischen Verbindungsstellen eingesetzt werden.

**Planfreie Knotenpunkte** werden besonders im Knoten des Autobahnnetzes verwendet, da sie unterschiedliche Straßenebenen verbinden wie zum Beispiel das klassische Kleeblatt, welches in der nachfolgenden Abbildung dargestellt ist.



Abbildung 4: Klassisches Kleeblatt (Engelmann, 2020)

Plangleiche Knotenpunkte haben grundlegend folgende Gestaltungs- und Betriebsformen:

- Einmündung mit Rechts-vor-Linksregelung
- Kreuzung mit Rechts-vor-Linksregelung
- Einmündung mit vorfahrtsregelnden Verkehrszeichen
- Kreuzung mit vorfahrtsregelnden Verkehrszeichen
- Einmündung mit Lichtsignalanlagen
- Kreuzung mit Lichtsignalanlagen
- Kreisverkehre

### 2.3.2 Kreuzung

Der Begriff „Kreuzung“ ist im allgemeinen Teil des Straßengesetzes unter Paragraph 29 rechtsgültig definiert. Demnach sind Kreuzungen durch eine Überschneidung zweier oder mehrerer Straßen auf gleicher Höhe gekennzeichnet (§ 29 StrG, 2021)

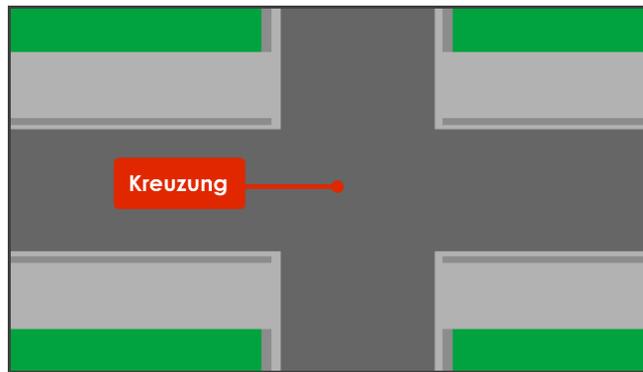


Abbildung 5: Kreuzung (Herbst, 2021)

### 2.3.3 Einmündung

Im Gegensatz zu Kreuzungen schneiden sich zwei Straßen, jedoch endet eine der beiden Straßen an der Überschneidung. In Abbildung 6 ist zur Veranschaulichung eine Einmündung grafisch dargestellt. Wenn die befahrene Straße auf eine andere Straße trifft, aber nicht fortgesetzt wird, mündet die befahrene Straße in die andere Straße ein (Herbst, 2021).



Abbildung 6: Einmündung (Herbst, 2021)

### 2.3.4 Kreisverkehr

Im Straßenverkehr beschreibt ein Kreisverkehr einen Knotenpunkt, der aus einer Kreisfahrbahn und Mittelinsel besteht. Die Kreisfahrbahn ist nur in einer Richtung zu befahren, das heißt linksdrehend im Rechtsverkehr – in Deutschland und vielen anderen Ländern zumindest - entgegen dem Uhrzeigersinn. Sie kann entweder einspurig, zweispurig oder auch komplexer sein. Kreisverkehre können bei Kreuzungen von mindestens zwei Straßen den Verkehrsfluss verbessern (ADAC, 2002).

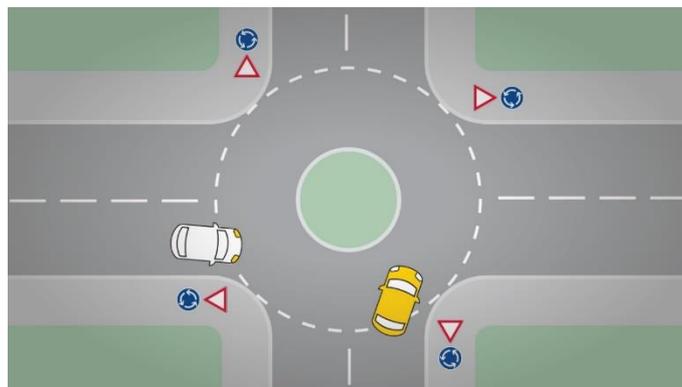


Abbildung 7: Kreisverkehr (ADAC, 2002)

Im Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren gibt es drei Typen (FGSV, 2006):

#### **Minikreisverkehr:**

- Außendurchmesser zwischen 13 m und 22 m
- mit überfahrbarer Mittelinsel
- Einsatzbereich beschränkt auf Innerortsstraßen mit maximal 50 km/h
- Kapazität bis maximal 1.200 Kfz/h je Zufahrt geeignet

#### **Kleiner Kreisverkehr:**

- Außendurchmesser innerorts zwischen 26 m – 60 m
- nicht überfahrbare Mittelinsel
- geometrische Besonderheit, möglich in ein- oder zweistreifige Kreisfahrbahn
- besonders geeignet ab einer Kapazität von 15000 bis 32000 Kfz/24 h

#### **Großer Kreisverkehr:**

- nicht überfahrbare Mittelinsel,
- mehrere, durch Markierung gekennzeichnete Fahrstreifen
- Außendurchmesser von mehr als 60 m
- ihr Betrieb sollte grundsätzlich mit Lichtsignalanlage erfolgen (FGSV, 2006)

### **2.3.5 Eigenschaften von Knotenpunkten**

Knotenpunkte besitzen diverse positive als auch negative Eigenschaften, die je nach der jeweiligen Verkehrssituation zu berücksichtigen sind. Je nach Verkehrsaufkommen muss geplant werden, welches System die optimale Lösung darstellt. Im Folgenden werden die wichtigsten Merkmale stichpunktartig zusammengefasst (FGSV, 2006).

#### **Vorteile von Kreisverkehren:**

- höhere Verkehrssicherheit, da Geschwindigkeiten im Kreisverkehr geringer
- bei geringem Verkehrsaufkommen keine Wartezeit für Verkehrsteilnehmer
- permanenter Verkehrsfluss trotz hohen Verkehrsaufkommens
- umweltfreundlicher da lange Warteschlangen weitgehend verhindert werden
- Reduzierung der Konfliktpunkte
- Kreisverkehrsplätze ermöglichen Anbindung von mehr als vier Zufahrten

#### **Nachteile von Kreisverkehren:**

- Gefahr, dass Autofahrer kleine Lücken mit riskanter Fahrweise ausnutzen
- längere Wartezeiten für Fußgänger
- Fläche der Mittelinsel bei großem Kreisverkehr für Verkehr nicht nutzbar

#### **Vorteile von Kreuzung- und Einmündung mit Lichtsignalanlagen:**

- verkehrsabhängige Steuerung anpassbar auf Verkehrsverhältnisse
- leichter Übergang für Fußgänger und Radfahrer.

#### **Nachteile**

- Festzeitprogramm der Lichtsignalanlagen bei hohen Verkehrsaufkommen nicht steuerbar
- Sicherheitsdefizite z.B. Nichteinhaltung der LSA aufgrund der Sichtbarkeit durch Wechsel der Wetterlage
- Erfordernis einer geringen Annäherungsgeschwindigkeit „Durchzugeffekt“ in der Freigabephase höhere Schwierigkeit durch Ausfall der LSA
- hohe Betriebsausgaben (Asphalt, 2022).

## 2.4 Bypass

Ein Bypass ist ein separater Fahrstreifen für Rechtsabbieger. Dieser ist abgegrenzt und dient zur Entlastung eines Knotenpunktes. Durch den Bypass kann die Leistungsfähigkeit beispielsweise einer Kreisverkehr Anlage gesteigert werden. Die Verkehrsteilnehmer können direkt rechts abbiegen, ohne in den Kreisverkehr einzufahren (Maurmaie, 2021).

## 2.5 Umweltspuren

Unter einer Umweltspur wird eine Fahrspur verstanden, welche hauptsächlich Busse aber auch Radfahrer und Taxen befahren dürfen. Einige Busspuren dürfen in Dortmund seit 2017 auch durch Elektrofahrzeuge genutzt werden. In Abbildung 8 ist solch eine Umweltspur durch Markierung gekennzeichnet worden (ADAC, 2019).



Abbildung 8: Umweltspur (Radio91.2, 2021)

Gemäß einer Befragung des Instituts INFAS Quo GmbH für den Automobilclub ADAC gaben befragte Stadtbewohner an, den Ausbau von Bus und Umweltspuren zu befürworten. Insgesamt wurden Verkehrsteilnehmer ab 16 Jahren aus 40 deutschen Städten mit jeweils über 200.000 Einwohnern befragt (ADAC, 2021).

## 2.6 Lichtzeichenanlagen

Eine Lichtzeichenanlage ist eine technische Anlage, welche gemäß § 37 StVO den Verkehr durch Lichtsignale an Kreuzungen, Einmündungen oder anderen Straßenpunkte steuert. Für Kraftfahrzeuge werden die Lichtsignale üblicherweise durch einen dreifeldigen Signalgeber ausgegeben, dieser ist in der Allgemeinheit als Ampel und in der Verkehrssprache als Wechsellichtzeichen bekannt. In Abbildung 9 wird ein Ampeldurchlauf dargestellt. Dabei sind Lichtsignale farbige Lichtzeichen mit der nachfolgender Farbfolge (FGSV, 2015; Krimmling, 2017):

- ROT
- ROT und GELB gleichzeitig
- GRÜN
- GELB



Abbildung 9: Ampelsystem in allen Phasen (Central, 2021)

### 2.6.1 Lichtsignalsteuerung

Um die unterschiedlichen Verkehrsauslastungen im Verkehr aufeinander abzustimmen und dem Straßenverkehr anzupassen, werden in Wuppertal vier Programme geschaltet. Diese sind untergliedert in vormittags, tags, nachmittags und nachts. So können verschiedene Auslastungen des Straßenverkehrs berücksichtigt werden und der jeweiligen Auslastung angepasst werden. Dazu werden innerhalb eines Programmes Zeitbereiche für verkehrsabhängige Entscheidungen eingeplant. Dabei wird unter anderem bei Fußgängeranlagen

geregelt, dass nur dann auf Grün geschaltet wird, wenn zuvor die Fußgängertaste betätigt wurde. Das Programm analysiert den Zeitbereich und überprüft, ob eine Umschaltung zulässig ist (Burmeister, 2022).

### 2.6.2 Verlustzeit

Es ist die Zeitdifferenz zwischen der idealen Reisezeit und der tatsächlichen Reisezeit des Fahrzeugs vom Start- zum Zielort. Bei der Bestimmung der idealen Fahrzeit wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug immer mit der maximal möglichen beziehungsweise erlaubten Geschwindigkeit fährt (Stegemann, et al., 1982).

### 2.6.3 Übergangszeiten

Die Übergangszeit für Kraftfahrzeuge ( $t_G$ ) beschreibt das zeitliche Übergangssignal Gelb, diese findet nach der Freigabezeit grün und vor der Sperrzeit rot statt. „Die Übergangszeit GELB ( $t_G$ ) richtet sich bei Kraftfahrzeugen nach der zulässigen Höchstgeschwindigkeit in der Knotenpunktzufahrt“ (FGSV, 2015).

Geschwindigkeiten und die dazugehörige Übergangszeit (FGSV, 2015):

- 50 km/h - Übergangszeit ( $t_G$ ) 3 s
- 60 km/h - Übergangszeit ( $t_G$ ) von 4 s
- 70 km/h - Übergangszeit ( $t_G$ ) von 5 s

### 2.6.4 Zwischenzeiten

Unter Zwischenzeit wird der Zeitverlauf zwischen dem Ende der Freigabezeit, also dem Lichtzeichen grün, und dem Beginn der Freigabezeit eines zuvor nicht freigegebenen Verkehrsstroms verstanden.

„Zwischenzeiten werden für die so genannten verriegelten oder zueinander nicht verträglichen Verkehrsströme berechnet. Nicht verträglich bzw. verriegelte sind die Verkehrsströme, die nicht zeitgleich grün haben dürfen“ (FGSV, 2015).

Um die Zwischenzeit  $t_z$  zu bestimmen, werden die Überfahrtzeit  $t_{\bar{u}}$ , die Räumzeit  $t_r$  und die Einfahrzeit  $t_e$  benötigt. Dabei soll gelten, dass

$$t_z = t_{\bar{u}} + t_r - t_e$$

ist. Die ermittelte Zwischenzeit  $t_z$  wird nach RiLSA auf volle Sekunden aufgerundet. Dabei soll weiter gelten, dass alle Kombinationen nichtverträglicher Verkehrsströme zu berechnen sind. Alle Verkehrsteilnehmer sind separat zu betrachten und zu berechnen. Das gilt sowohl für Kraftfahrzeuge, Fahrzeuge des Öffentlichen Nahverkehrs (ÖPNV) sowie für Radfahrer und Fußgänger. Um dieses beispielhaft zu veranschaulichen, werden in einer Zwischenzeitenmatrix für die jeweiligen Signalgruppen die zugehörigen Zwischenzeiten abgebildet. Signalgruppen sind in dieser Thesis definiert als Ampelschaltungen. Diese können der Abbildung 10 entnommen werden (FGSV, 2015). Im Abschnitt 2.7.5 wird die Zwischenzeitberechnung anhand Beispielrechnungen mit und ohne Radfahrer veranschaulicht.

		beginnende Signalgruppen															
		K1*)	K2	K3	K4	K5	K6	K7Z	R1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	
endende Signalgruppen	K1*)			4			5	6		4						7	
	K2			5	8	5	5		4	2		8	8				
	K3	5	4			4			1		4	4					6
	K4		2				2								4		
	K5		3	5			4			6						3	
	K6	4	4		10	5			4			6	6				4
	K7Z	2															3
	R1		2	6			3			9						3	
	F1	9	7			6			4								
	F2			6													
	F3		4	6			4										
	F4		4				4										
	F5				4												
	F6	7				8			9								
F7			5			7	6										

Abbildung 10: Bsp. Zwischenzeitmatrix eines Knotenpunkts (FGSV, 2015)

### 2.6.5 Überfahrzeiten, Einfahrzeiten und Räumzeiten

Weiter muss in dieser Thesis die Überfahrzeit  $t_{\ddot{u}}$ , die Einfahrzeit  $s_e$  und die Räumzeit  $t_r$  betrachtet werden. Dabei handelt es sich bei der Überfahrzeit  $t_{\ddot{u}}$  um die Zeitdauer zwischen Ende der Freigabezeit und dem Beginn der Räumzeit. Die Räumzeit  $t_r$

errechnet sich aus der Summe von Räumstrecke  $s_r$  und Fahrzeuglänge  $l_F$ , dividiert durch die Räumgeschwindigkeit  $v_r$ :

$$t_r = \frac{s_r + l_F}{v_r}$$

Der Quotient aus Einfahrweg  $s_e$  und Einfahrtgeschwindigkeit  $v_e$  ergibt die Einfahrzeit  $t_e$ :

$$t_e = \frac{s_e}{v_e}$$

Der Einfahrweg  $s_e$  ist die Strecke von der Haltelinie bis zum Konfliktpunkt. Der Konfliktpunkt hier, ist der Ort, an dem eine Kollision stattfinden könnte.

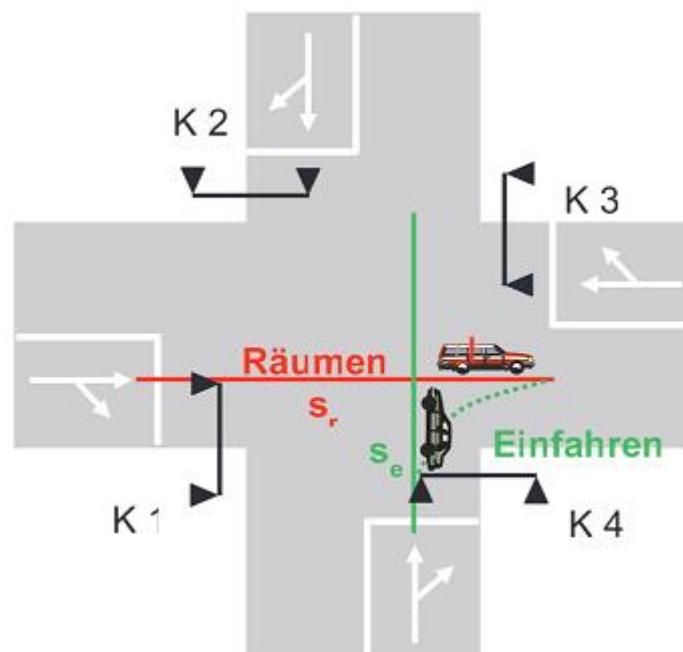


Abbildung 11: Prinzipskizze zum Beispiel der Zwischenzeitberechnung (Krimmling, 2017)

### Beispielrechnung der Zwischenzeiten

Besonders gut wird die Formel durch das Rechenbeispiel von Krimmling veranschaulicht.

In Abbildung 11 beschreibt der Autor die Situation folgendermaßen:

Der als K1 bezeichnete Kfz-Verkehrsstrom räumt geradeaus die Kreuzung. Der einfahrende Strom K4 kann geradeaus fahren oder nach rechts abbiegen. Die in

der folgenden Rechnung verwendeten Werte sind rein fiktiv und dienen nur zu Veranschaulichungszwecken.

- Ein Räumweg  $s_r$  von 26 m für K1 gegen den einfahrenden Strom K4 geradeaus.
- Ein Räumweg von 39 m für K1  $s_r$  gegen den rechts abbiegenden Strom K4

$$t_{\bar{u}} = 3 \text{ s}, v_r = 10 \text{ m/s}, l_F = 6 \text{ m}, v_e = 11,1 \text{ m/s}$$

Nach RiLSA sind die Fahrzeuglängen  $l_k$  nach Fahrzeugtyp eine klar definierte Konstante:

- Fahrräder: 0 m
- Kraftfahrzeuge: 6 m

(einschließlich Linienbusse, Lastzüge)

- Straßenbahnen: 15m

Berechnung der Zwischenzeit für den räumenden K1 gegen den **geradeaus** einfahrenden K4:

$$t_z = \frac{26 \text{ m} + 6 \text{ m}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}}} + 3 \text{ s} - \frac{11,1 \text{ m}}{11,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 5,2 \text{ s}$$

Aufgerundet wird auf ganze Sekunden, hier entspricht das Ergebnis 6 s.

Berechnung der Zwischenzeit für den räumenden K1 gegen das **rechts abbiegende Fahrzeug**:

$$t_z = \frac{39 \text{ m} + 6 \text{ m}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}}} + 3 \text{ s} - \frac{15,1 \text{ m}}{11,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 6,1 \text{ s}$$

Aufgerundet auf ganze 7 Sekunden. Aus den gewonnenen Zwischenzeiten wird immer das größte Ergebnis gewählt, in diesem Beispiel sind es 7 Sekunden.

Da dieses Beispiel ohne Berücksichtigung von Radfahrern stattgefunden hat, wird ein weiteres Beispiel mit Radfahrern durch Krimmling erläutert.

Die Parameter werden an die zu untersuchende Verkehrssituation angepasst und die Werte entsprechend konfiguriert. Bei Straßen mit Radfahrern sind zum Beispiel folgende Parameter realistisch:

$$t_{\bar{u}} = 1 \text{ s}, v_r = 4 \text{ m/s}, l_F = 0 \text{ m}$$

Für den räumenden Radfahrer, der von K1 gegen den **rechts abbiegenden** K4 fährt, sieht die Ermittlung der Zwischenzeit wie folgt aus:

$$t_z = \frac{39 \text{ m} + 0 \text{ m/s}}{4 \text{ m/s}} + 3 \text{ s} - \frac{15,1 \text{ m}}{11,1 \text{ m/s}} = 9,4 \text{ s}$$

Aufgerundet wird auf 10 Sekunden. In der Zwischenzeitmatrix wird für den Schnittpunkt von K1 und K4 die Zahl 10 gemäß den 10 Sekunden notiert (Krimmling, 2017).

### 2.6.6 Signalzeitenplan und Festzeitsteuerung

Der Signalplan repräsentiert die chronologische Reihenfolge der zeitlichen Signalzustände (Schnabel, et al., 1997). Der Signalplan in Abbildung 12 basiert auf einem fiktiven, sehr einfachen Beispiel für Zwischenzeitberechnungen.

Im Beispiel sind die Signalgruppen K1, K2, K3 und K4 zu sehen. Die Signalgeber, beziehungsweise Ampeln, die immer zur gleichen Zeit das gleiche Farbbild anzeigen, werden in einer Signalgruppe zusammengefasst. Die Signalgruppen K1, K2, K3 und K4 bestehen hier jeweils aus zwei Signalgebern. Beide zeigen zeitgleich rot, gelb, grün oder rot-gelb an.

Ein Festzeitsignalplan ist ein zeitlicher Schaltablauf von mehreren Signalgruppen, die sich periodisch wiederholen. Diese Periode wird Umlaufzeit  $t$  genannt. Der in Abbildung 12 Beispielsignalzeitenplan hat eine Umlaufzeit von 60 s.

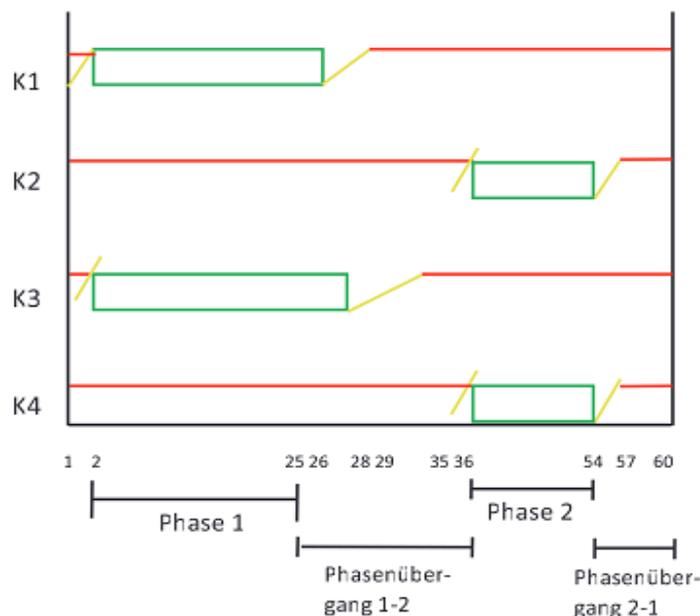


Abbildung 12: Beispiel für ein Signalzeitenplan mit 4 Signalgruppen (Krimmling, 2017)

Als Richtwerte für die Umlaufzeiten gelten minimal 30 s und maximal 90 s (FGSV, 2015). Das bedeutet, wenn K1 in Sekunde eins grünes Licht erhält, beginnt das nächste grüne Licht in Sekunde 61, gefolgt von Sekunde 121. Dieses Beispiel ist sehr einfach. Eine Lichtsignalanlage umfasst in der Regel eine Vielzahl von Signalgruppen wie geradeaus fahrende und abbiegende Kraftfahrzeuge, Busse, Radfahrer und Fußgänger. Große Anlagen haben mehr als 60 Signalgruppen. Abbildung 10 zeigt einen realen, festzeitgesteuerten Signalzeitenplan mit 32 Signalgruppen (Krimmling, 2017).

Ein Festzeitsignalprogramm wird durch den Signalzeitenplan, die Zwischenmatrix und dem Signallageplan gemeinsam als Resultat zusammengesetzt (FGSV, 2015).

### 2.6.7 Verkehrsampel mit Countdown

Eine weitere Variante von Lichtsignalanlagen ist die Verkehrsampel mit einem Countdown. An einer Lichtsignalanlage kann den Verkehrsteilnehmern die Dauer zum Übergang in die nächste Phase mithilfe einer Sekunden-Anzeige der laufenden Phase, vermittelt werden. Eine mögliche Countdown Ampel kann wie In Abbildung 13 aufgestellt werden.

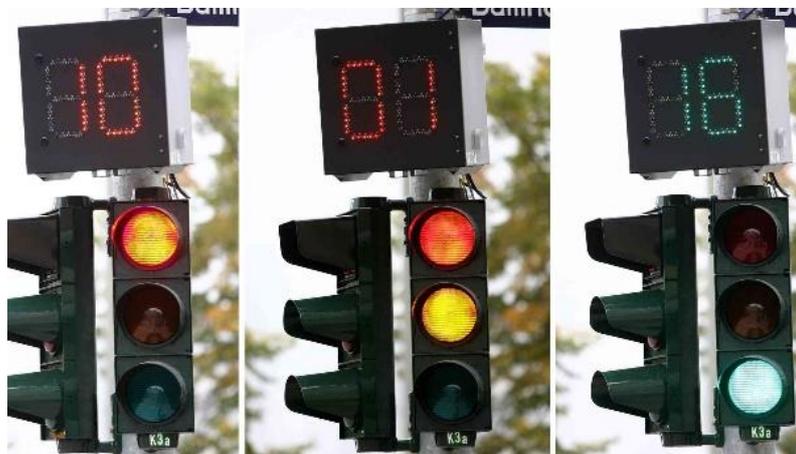


Abbildung 13: Countdown Ampel (Rehder, 2019)

Diese digitalen Anzeigen können sowohl für Fahrzeuge als auch für Passanten angebracht werden. Folglich kann hierdurch der Verkehrsfluss verbessert werden, da beispielsweise die Autofahrer in der Rotphase früh genug den Wechsel in die Grünphase erkennen können. Somit können die Fahrer frühzeitig den ersten Gang einlegen, um ohne Verzögerung beim Phasen-Wechsel loszufahren. Andererseits können die Fahrer bei der verbleibenden Anzeige der Grünphase bremsen, um

nicht ordnungswidrig über Rot zu fahren. Nachteile dieser Displays sind unter anderem entstehenden Mehrkosten für den Betrieb und die Hardware. Außerdem könnten die Countdowns bei verkehrsabhängigen Ampelsystemen zu Problemen führen (ADAC, 2021).

## **3 Verkehrssimulation**

In diesem Kapitel werden zuerst die relevanten Definitionen genannt, anschließend werden die Verkehrsflussmodelle vorgestellt: mikroskopische, mesoskopische und makroskopische Modelle. „Verkehrsmodelle beschreiben die Entstehung des Verkehrs und dessen Verteilung auf das Straßen- und Wegenetz“ (Füsser, 1997).

### **3.1 Simulation**

Von einer Simulation wird gesprochen, wenn reale Prozesse oder Systeme über eine bestimmte Zeit imitiert werden. Durch Eingabe bestimmter Schlüsseleigenschaften oder Verhaltensweisen wird die Simulation dargestellt. Hierbei können Rückschlüsse auf die charakteristischen Merkmale des dargestellten realen Ablaufs gezogen werden. Die Simulation ist eine entscheidende Methodik zur Lösung vieler Schwierigkeiten der realen Welt. In einer Simulation wird das Verhalten eines Systems beschrieben und analysiert. Zudem können hypothetische Fragen über das reale System aufkommen (Banks, 1998).

### **3.2 Verkehrssimulation**

Die Verkehrssimulation beschreibt einen modellierten Verkehrsablauf. Hierbei werden bewegliche (wie zum Beispiel Personen, Fahrzeuge) und unbewegliche Objekte (wie zum Beispiel Ampelsteuerungen) in ihrem dynamischen Verhalten beschrieben. Sobald der Verlauf mit der Realität gleichwertig ist, wird von einem Simulationsmodell gesprochen. Die Simulationsergebnisse können mit den Daten aus der Realität verglichen werden, um auf der Grundlage von Ursache-Wirkungs-Prinzipien letztendlich ein Fazit ziehen zu können (Schaal, 2006).

Für die Verkehrssimulation gibt es drei Modellarten: makroskopische, mikroskopische und mesoskopische Modelle. Bei diesen drei Modellen kann der Verkehr unterteilt werden, dass der Fokus sich auf ein bestimmtes Modell konzentriert, somit ist ein Wechsel zwischen unterschiedlich großen und kleinen Verhältnissen nicht nötig. Die nächste Abbildung zeigt die verschiedenen Fokussierungen der Ebenen.

### 3.3 Modellarten

Im folgenden Abschnitt werden die Modelle mikroskopisch, mesoskopisch und makroskopisch erläutert.



Abbildung 14: Modellarten (eigene Darstellung)

#### 3.3.1 Mikroskopisches Modell

Die mikroskopische Modellierung von Verkehrsströmen basiert auf der Beschreibung der Bewegung jedes einzelnen Fahrzeugs, das den Verkehrsstrom bildet. Dies impliziert die Modellierung der Aktionen Beschleunigung, Abbremsung und Spurwechsel jedes einzelnen Fahrers als Reaktion auf den umgebenden Verkehr. Theorien, die beschreiben, wie ein Fahrzeug einem anderen Fahrzeug folgt, wurden vor allem in den 1950er und 1960er Jahren entwickelt, nach der bahnbrechenden Entwicklung von Theorien zur Fahrzeugverfolgung nach Reuschle (Barceló, 2010). Diese Art von Modell ist sehr detailliert und kann daher für die Darstellung großer Straßennetze rechenintensiv sein. Mikroskopische Modelle sind häufig in eine Simulationssoftware eingebettet.

Mikroskopische Modelle sind genauer bei der Analyse von einzelnen Strecken. Zur Simulation der mikroskopischen Verkehrssituation sind mehrere Parameter zu berücksichtigen, so etwa Netzdaten, zusätzliche Verkehrsinfrastruktur zum Beispiel Ampel und Verkehrsnachfrage. Diese Parameter bilden ein Simulationsszenario

(Systems, 2018). Mikroskopische Modellierung ermöglicht die Untersuchung von individuellen Wechselwirkungen. Diese Modelle beschreiben die Interaktionen zwischen Fahrzeugen und auch die Reaktionen eines Fahrzeugs in Bezug auf die Wahrnehmung seiner Umgebung. Mikroskopische Modelle bieten eine fahrzeugspezifische Auflösung, sodass Verkehrsverhältnisse sehr genau abgebildet werden können.

### **3.3.2 Mesoskopisches Modell**

Das mesoskopische Modell ist die Zusammensetzung aus makroskopischen und mikroskopischen Anordnungen. Während große Netzwerke und allgemeine Maßstäbe zusammengesetzt werden, werden Fahrzeuge hierbei als Einzelemente modelliert. Daher eignen sich mesoskopische Modelle besonders gut für Routing- und Verkehrssteuerungsprobleme (Semrau, 2018).

### **3.3.3 Makroskopisches Modell**

Die makroskopische Modellierung von Verkehrsströmen basiert in der Regel auf der Verkehrstheorie. Das Ziel dahinter ist die Beschreibung der zeitlich-räumlichen Entwicklung der Einflussfaktoren, die die makroskopischen Ströme charakterisieren. Die drei Einflussfaktoren sind folgende:

- Verkehrsfluss  $q(x, t)$
- Geschwindigkeit  $u(x, t)$
- Verkehrsdichte  $k(x, t)$

Von ihnen wird angenommen, dass sie zu jedem Zeitpunkt  $t$  und an jedem Punkt  $x$  definiert sind (Gerlough, et al., 1975).

Aus diesem Grund können Staus und Ausbreitungsgeschwindigkeiten im Verkehrsfluss mit makroskopischen Modellen dargestellt werden. Diese Modelle werden beispielsweise verwendet, wo Fahrstreifenwechsel nicht relevant oder sich mikroskopische Modelle schwer darstellen lassen (Treiber, et al., 2010). Makroskopische Modelle haben ihre Anwendungen in großräumigen Darstellungen der Verkehrsabläufe, da bei diesem Modell nicht einzelne Fahrzeuge, sondern das komplette Geschehen des Verkehrs insgesamt betrachtet wird (Semrau, 2018).

## 4 Simulationssoftware SUMO

SUMO ist eine Verkehrssimulationssoftware. Sie ist seit 2001 verfügbar und sie ermöglicht die Modellierung von intermodalen Verkehrssystemen. Kraftfahrzeuge, Lastkraftwagen, öffentliche Verkehrsmittel, Fußgänger und Radfahrer können eingefügt und simuliert werden. SUMO enthält zahlreiche unterstützende Werkzeuge zur Erstellung von Szenarien. Die Erstellung, Ausführung und Auswertung von Verkehrssimulationen wie z.B. Netzimport, Routenberechnung, Visualisierung und Emissionsberechnung sind die Kernaufgaben der Software. SUMO kann mit benutzerdefinierten Modellen erweitert werden und bietet verschiedene Schnittstellen zur Anwendungsprogrammierung, um die Simulation auch aus der Ferne zu steuern (Eclipse, 2022). Das Car-Following-Modell, zu Deutsch ‚Auto-Folgemodelle‘, sind typischerweise da, um die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs zu berechnen, indem die Geschwindigkeit und der Abstand des vorausfahrenden Fahrzeugs betrachtet wird. SUMO benutzt eine Erweiterung des zufälligen Fahrzeugverfolgungsmodells von Stefan Krauss.

### 4.1 Simulation

Die Anwendung des Simulators wird in diskreter Zeit durchgeführt. Die Zeit ist variabel und kann bis auf eine Mikrosekunde verkürzt werden. Dabei wird die Zeit auf einer Anzeige innerhalb des Programmes eingeblendet, die den aktuellen Zeitpunkt der Simulation aufzeigt. Diese Anzeige und der Regler werden in der weiteren Thesis als intern definiert. Der Regler ist auf einer Schiebeleiste, die während der Simulation verändert werden kann. Dadurch wird eine Betrachtung über den gesamten Zeitbereich ermöglicht. Die Zeit ist als ganzzahliger Wert dargestellt. Durch diese Option erlaubt das Programm eine Beschleunigung und eine Verlangsamung der Simulation für eine genauere Untersuchung der Verkehrslage. Dieses Modul wird vor allem bei der Kenntniserlangung und bei der Bewertung einzelner Fahrspuren für diese Thesis verwendet. Die maximale Simulationsdauer für SUMO beträgt 49 Tage. So können auch längerfristige Simulationen über einen größeren Zeitraum beobachtet werden. Die interne Simulation wird durch die Fahrzeugspur und die vom Beginn der Spur aus zurückgelegte Strecke beschrieben. Zur Berechnung der Geschwindigkeit des

Fahrzeugs im Netz wird der Wert auf Basis des Car-Following-Modells berechnet. In einer Simulation besteht die Möglichkeit, das eigene Verhalten des Fahrers einzuschränken und jedem Fahrzeug ein eigenes Verhalten zuzuordnen. Sowohl der Fahrer als auch jedes Fahrzeug können mit eigenen Parametern ausgestattet werden. Die in der Regel von der Fahrzeuglänge bis zu Modellierungsparametern reichen, die sich nach Belieben in der Zeit bewegen. Die verschiedenen Parameter arbeiten zusammen. Die Berechnung des Fahrspurwechsels erfolgt mit einem Modell, das mit Hilfe der Implementierung von SUMO entwickelt wurde. Weiter werden auch ergänzende grafische Elemente wie Polygone, Bilder oder Punkte zur Verfügung gestellt, die eine bessere Visualisierung des simulierten Szenarios ermöglichen. Die grafische Benutzeroberfläche bietet auch die Möglichkeit, mit dem Szenario zu interagieren, z.B. die Route zu ändern, umzuleiten oder einen Geschwindigkeitswechsel einzufügen. SUMO bietet die Möglichkeit, für jeden Simulationslauf unterschiedliche Ergebnisse zu erzeugen. Zusätzlich zu den herkömmlichen Verkehrsmessungen können auch die Schadstoffemissionen, Lärmemissionen und Kraftstoffverbrauch ausgegeben werden. Die von SUMO erzeugten Dateien haben das Format XML und sind daher über MS-Excel verarbeitbar (Krajzewicz, 2012).

## **4.2 Erstellung von Straßennetzen**

SUMO stellt die Straßennetze der Welt als Graphen dar, in dem Kreuzungen als Knoten und Straßen als Linien oder Kanten dargestellt werden. Die Kreuzungen bestehen aus einer Position, einer Form und einer Rechtsabbiegenorm, auf denen Ampeln überschrieben werden können. Kanten sind einseitige Verbindungen zwischen den Knotenpunkten und haben eine unveränderliche Anzahl von Fahrspuren. Die Fahrspuren haben auf ihrer Geometrie, Informationen über die Fahrzeuge, die sie befahren können und die Höchstgeschwindigkeit auf ihnen. Die Fahrspuren stellen somit die Veränderungen entlang einer Straße durch mehrere Kanten dar. Darüber hinaus lässt sich sagen, dass SUMO in das Straßennetz, auch die Pläne von Ampeln, Verbindungen zwischen Fahrspuren über Kreuzungen enthält, die beschreiben, welche Fahrspuren genutzt werden können, um das Ziel zu erreichen. Fahrspuren können genutzt werden, um eine nachfolgende Fahrspur zu erreichen. Man kann das Straßennetz aus SUMO aus der Anwendung heraus

generieren mit „netgenerate“ oder durch Importieren einer Digitalkamera-Roadmap mit "netCONVERT" ausgeführt. Mit der letztgenannten Anwendung werden drei Arten von Straßennetzen erstellt: das "Manhattan"-Netz, wie z.B. Gitternetze, kreisförmige "Spinnen"-Netze und Zufallsnetze. Dies wird in Abbildung 15 veranschaulicht.

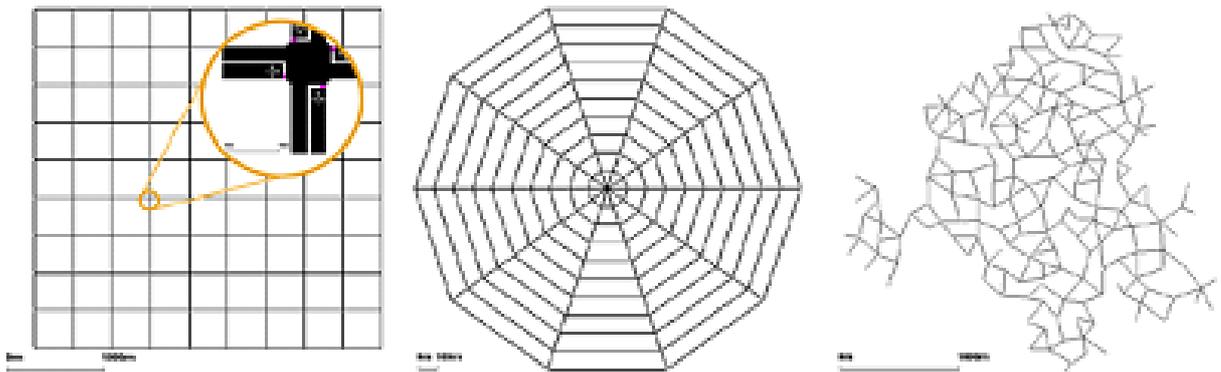


Abbildung 15: Beispiele für abstrakte Straßennetze mit „Netgenerieren“ (Krajzewicz, 2012)

Der Netzimporter (NetConvert) konvertiert auch Netze aus anderen Verkehrssimulatoren wie zum Beispiel aus VISUM, MATSim oder Vissim. Andere digitale Netzwerkformate wie OpenStreetMap und Shapefiles können gelesen werden. Die folgenden Abbildungen zeigen die Möglichkeiten des Imports von Straßen in OpenStreetMap-Web und vergleichen sie mit einer SUMO-Darstellung. Mit dem Werkzeug namens Netedit können Straßennetze grafisch bearbeiten werden. Dies ist oft einfacher und schneller als die Vorbereitung von XML-Eingabedateien. Es kombiniert auch die einzelnen Schritte der Generierung des Vermessungsnetzes mit NetConvert und das GUI Inspektionsnetz mit NetConvert und der GUI Simulation (Krajzewicz, 2012).

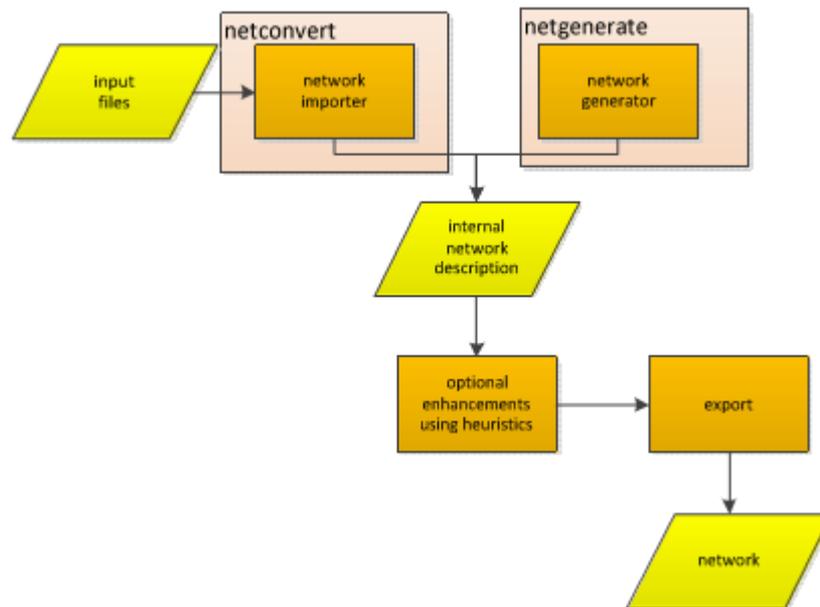


Abbildung 16: Netzvorbereitungsverfahren in Netconvert und Netgenerate (Krajzewicz, 2012)

### 4.3 Fahrzeuge und Routen

SUMO ist ein mikroskopischer Simulator, in dem jedes Fahrzeug explizit mindestens durch eine Identifikation, die Abfahrtszeit und die durchlaufene Route definiert ist. Unter Route wird die vollständige Liste der Kanten verstanden, die zwischen dem Anfang und Ende einer Route liegen. Bei Bedarf kann ein Fahrzeug auch durch die Eigenschaft seiner Abfahrts- und Ankunftszeit, die verwendeten Fahrspuren, die genaue Position an einer Kante oder auch die Geschwindigkeit sowie des Fahrzeug-Typs zugewiesen werden. Modellvariablen und Eigenschaften wie ihre Emissionen oder Schadstoffe, Lärm, Lärmbelästigung können damit genauer beschrieben werden. Weitere Variablen geben Informationen, wie das Fahrzeug selbst auf der grafischen Oberfläche innerhalb einer Simulation aussieht (Krajzewicz, 2012).

### 4.4 Nedit

Nedit ist ein grafischer Karteneditor für SUMO, mit dem Straßennetze erstellt und Einstellungen bestehender Netzwerke verändert werden können. Mit einer leistungsfähigen Auswahl- und Hervorhebungsschnittstellen kann Nedit zum Entfernen von Fehlern aus Netzwerkattributen verwendet werden. Nedit ist auf

Netconvert aufgebaut. Dabei verfügt Nedit über unbegrenzte Undo/Redo-Funktionen. Undo/Redo-Funktionen ermöglichen, die Operation des letzten Arbeitsschritts zu wiederholen und zum vorherigen Operationsschritt zurückzukehren. Dies ermöglicht eine schnelle Korrektur von Bearbeitungsfehlern. Editierbefehle werden in der Regel mit einem Linksklick, abhängig von dem aktuellen Editiermodus, erteilt. Die Benutzeroberfläche ist eng an die von SUMO-GUI angelehnt. Zusätzliche Tastaturkürzel sind im Hilfemenü dokumentiert (Eclipse Foundation Inc., 2022).

## 4.5 OpenStreetMap OSM WEBWIZARD

Der OSM Web Wizard bietet eine einfache Lösung für den Einstieg in SUMO. Beginnend mit der Auswahl des Kartenabschnitts OpenStreetMap können zufällige Verkehrsanforderungen in SUMO-Gui konfiguriert, ausgeführt und visualisiert werden. Der OSM-Webassistent besteht im Wesentlichen aus einer Reihe von Python-Skripten, die sich im Tools-Verzeichnis, also im Stammverzeichnis der SUMO-Installation befindet. Die Funktion führt von der Auswahl des Kartenausschnitts über die Definition der Verkehrsanforderungen hin zu der Ausführung und Visualisierung der Szene im SUMO-Gui (Lopez, et al., 2018).



Abbildung 17: OSM Webwizard Robert-Daum-Platz (SUMO, 2021)

Die OSM-Webwizard Anwendung ist ein nützliches Werkzeug für die Vorbereitung eines ersten Szenarios, welches mit Python-Werkzeugen arbeitet. Dieses Tool ermöglicht die Erstellung eines Simulationsszenarios mit wenigen Klicks auf einer browserbasierten Oberfläche, wie in Abbildung 17 zu sehen. Der gewünschte Ort

wird aus einer Kartendarstellung zusammen mit einer Reihe von parametrisierten Verkehrsmodi ausgewählt. Das Tool verwendet diese Informationen zum Herunterladen und Importieren der Netzdaten von OpenStreetMap mit den Parametern aus den ausgewählten Verkehrsmodi. Dann wird zufälliger Verkehr generiert, um das Netz zu bevölkern. Dieser bewegt sich durch das Netz entsprechend einer dynamischen Routenzuweisung, die das Routing der öffentlichen Verkehrsmittel für einzelne Personen beinhaltet (Lopez, et al., 2018). Durch das Klicken auf die Schaltfläche „Generieren“ wird das Simulationsnetzwerk für das ausgewählte Gebiet basierend auf OSM-Daten erstellt, eine zufällige Nachfrage generiert und die SUMO-GUI gestartet (Eclipse Foundation Inc., 2022).

## 4.6 Anwendungsbereiche von SUMO

SUMO wurde in folgenden Projekten angewendet:

- Bewertung der Leistung von Ampeln, einschließlich der Bewertung moderner Algorithmen bis hin zur Bewertung von Wochenzeitplänen.
- Die Routenwahl von Fahrzeugen wurde untersucht, einschließlich der Entwicklung neuer Methoden, der Bewertung von umweltbewusstem Routing auf der Basis von Schadstoffemissionen und Untersuchungen zu netzweiten Einflüssen autonomer Routenwahl.
- SUMO wurde eingesetzt, um Verkehrsprognosen für die Behörden der Stadt Köln während des Papstbesuches 2005 und während der Fußballweltmeisterschaft 2006 zu erstellen.
- SUMO wurde zur Unterstützung des simulierten Telefonier Verhaltens im Fahrzeug eingesetzt, um die Leistung der GSM-basierten Verkehrsüberwachung zu bewerten.
- SUMO wird von der V2X-Gemeinschaft häufig verwendet, um sowohl realistische Fahrzeugspuren zu liefern als auch Anwendungen in einer Online-Schleife mit einem Netzwerksimulator zu bewerten.
- KI-Training von Ampelplänen
- Simulation der verkehrlichen Auswirkungen von autonomen Fahrzeugen
- Simulation und Validierung von autonomen Fahrfunktionen in Zusammenarbeit mit anderen Simulatoren
- Simulation von Parkverkehr

- Simulation des Eisenbahnverkehrs für die KI-basierte Disposition von Fahrzeugen
- Verkehrssicherheit und Risikoanalyse
- Berechnung von Emissionen, Lärm und Schadstoffe. (Lopez, et al., 2018)

## 4.7 Auswertungsparameter über TriplInfo

Die Software gibt über die TriplInfo Skripte folgende Werte aus, diese sind in der Tabelle 1 zu sehen. Am Ende einer Simulation können alle, die in Tabelle 1 aufgelisteten Kenndaten aufgerufen werden, diese beschreiben die zuvor ausgeführte Simulation. In dieser Thesis wurde hauptsächlich mit dem Parameter timeLoss, welcher in Tabelle 1 rot markiert ist, gearbeitet.

Tabelle 1: Auswertungsparameter (Eclipse Foundation Inc., 2021)

Bezeichnung	Einheit	Erläuterung
id	(vehicle) id	Der Name des Fahrzeugs, das durch diesen Eintrag beschrieben wird
depart	(simulation) seconds	Die tatsächliche Abfahrtszeit (der Zeitpunkt, zu dem das Fahrzeug in das Netz aufgenommen wurde)
departLane	(lane) id	Die Kennung der Fahrspur, auf der das Fahrzeug seine Fahrt begonnen hat
departPos	m	Die Position auf der Fahrspur, an der das Fahrzeug seine Fahrt begonnen hat
departSpeed	m/s	Die Geschwindigkeit, mit der das Fahrzeug seine Fahrt begonnen hat
departDelay	(simulation) seconds	Die Zeit, die das Fahrzeug warten musste, bevor es seine Fahrt antreten konnte
arrival	(simulation) seconds	Der Zeitpunkt, zu dem das Fahrzeug sein Ziel erreichte
arrivalLane	(lane) id	Die Kennung der Fahrspur, auf der sich das Fahrzeug befand, als es sein Ziel erreichte
arrivalPos	m	Die Position auf der Fahrspur, auf der sich das Fahrzeug bei Erreichen des Ziels befand
arrivalSpeed	m/s	Die Geschwindigkeit, die das Fahrzeug bei der Ankunft am Zielort hatte
duration	(simulation) seconds	Die Zeit, die das Fahrzeug für die Strecke benötigt hat
routeLength	m	Die Länge der Fahrtstrecke des Fahrzeugs
waitingTime	s	Die Zeit, in der die Fahrzeuggeschwindigkeit unter oder gleich 0,1m/s war (planmäßige Stopps zählen nicht)

stopTime	s	Die Zeit, in der das Fahrzeug einen geplanten Halt einlegte
<b>timeLoss</b>	<b>seconds</b>	<b>Die Zeit, die durch Unterschreiten der Idealgeschwindigkeit verloren geht. (Die Idealgeschwindigkeit umfasst den individuellen speedFactor; Verlangsamungen aufgrund von Kreuzungen usw. führen zu timeLoss, geplante Stopps zählen nicht)</b>
rerouteNo	#	Die Nummer, zu der das Fahrzeug umgeleitet wurde
vtype	ID	Der Fahrzeugtyp
speedFactor	float	Der individuelle Geschwindigkeitsfaktor des Fahrzeugs (möglicherweise aus einer Geschwindigkeitsverteilung zu Beginn der Simulation gezogen)
vaporized	bool	Ob das Fahrzeug vor Erreichen seines Ziels aus der Simulation entfernt wurde

## 5 Festlegung der SUMO Parameter

In diesem Kapitel werden die Daten der zu untersuchenden Kreuzung in den Kontext der Verkehrssituation eingeordnet. Daraufhin wird die Spitzenbelastung der Kreuzung vormittags und nachmittags analysiert. Die Spitzenbelastung wird in SUMO eingepflegt und als Ausgangsparameter eingestellt.

### 5.1 Kreuzung Robert-Daum-Platz

Der alte Tannenberglplatz, heute Robert-Daum-Platz, trägt den Namen des damaligen Wuppertaler Oberbürgermeisters Robert Daum, welcher 1966 verstorben ist. Seit der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg und der Ausdehnung der Talsohle hat sich der Platz zu einem relevanten Verkehrsknotenpunkt entwickelt. Die gleichnamige Bus- und Schwebbahnhaltestelle, das GEFA Hochhaus und die katholische Hauptschule West befinden sich unmittelbar an ihm (Wolfgang, 2012).

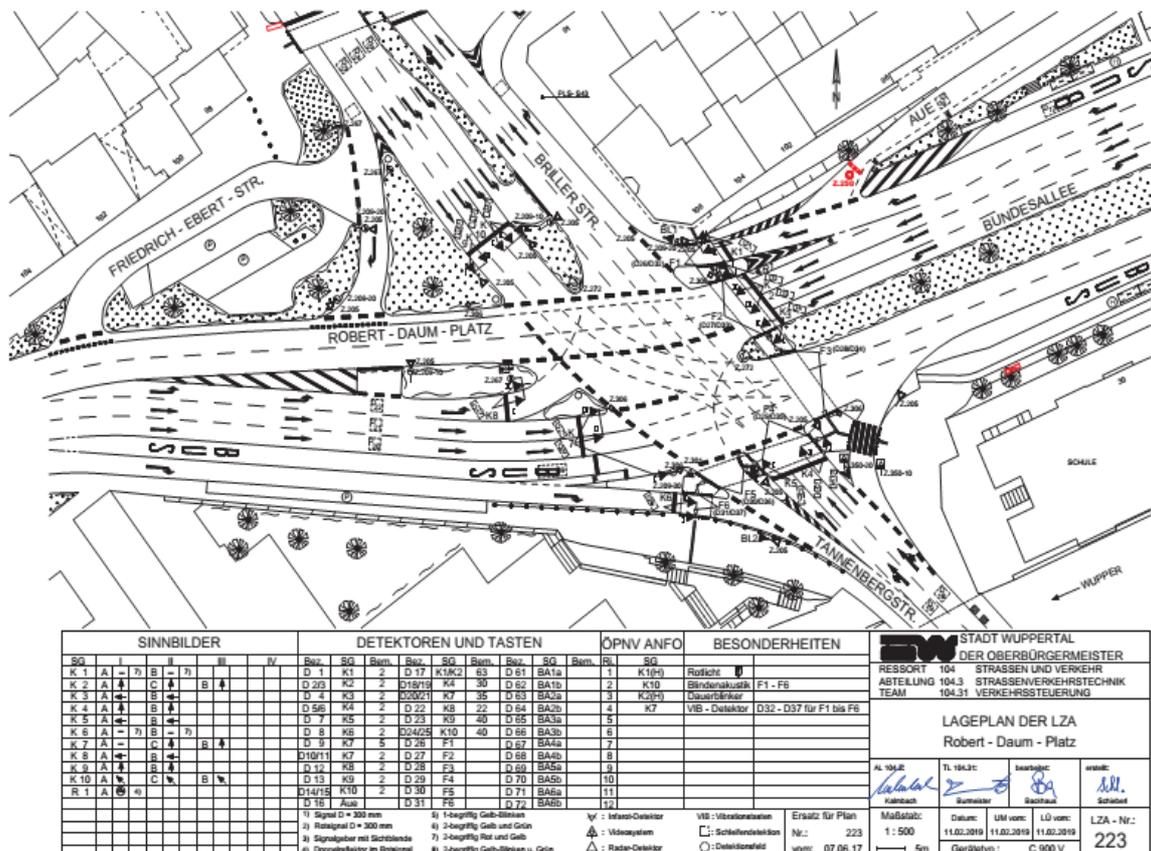


Abbildung 18: Lageplan Robert-Daum-Platz (Stadt Wuppertal)

Die vorliegende Kreuzung in Abbildung 18 enthält 10 Signalgruppen und 72 Detektoren. Hiervon sind nur die ersten 15 Detektoren für diese Thesis relevant, da

die anderen Detektoren sich an für diese Thesis nicht-relevanten Stellen befinden. Zur Untersuchung werden hierbei nur die unmittelbaren Detektoren verwendet, die in direkter Verbindung mit der Kreuzung stehen.

### **Fußgängertunnel am Robert-Daum-Platz**

Laut Beschluss Nr. VO/0437/07 der Stadt Wuppertal sind die Fußgängerunterführungen am Robert-Daum-Platz im Jahr 2008 geschlossen und versiegelt worden. Grund dafür waren die hohen Unterhaltskosten. Weiterhin war die Barrierefreiheit nicht gegeben. Dafür sind behindertengerechte signalisierte Fußgängerüberwege oberirdisch entstanden.

„Die Unterhaltungskosten der bestehenden Tunnel (Beleuchtung, Tunnelreinigung, Bauwerksprüfung, Bauwerksunterhaltung, Unterhaltung der technischen Anlagen) betragen [für das Jahr 2008] [...] jährlich ca. 25.300,00 €. Nach der nun geplanten Variante verbleiben Unterhaltungskosten für den Tunnel B7/Tannenbergstraße in Höhe von 7.600,00 €. Somit können nach Umsetzung der Maßnahme jährlich ca. 17.700,00 € an Unterhaltungskosten für die Tunnel eingespart werden“ (Uebrick, 2007).

## **5.2 Bestandsanalyse Kreuzung Robert-Daum-Platz**

In diesem Abschnitt wird der Verkehrsbestand von 2018 in Kombination mit der gegebenen Lichtsignalsteuerung von morgens und nachmittags vorgestellt. Die für die Bestandsanalyse verwendeten Daten wurden von der Verkehrstechnik der Stadt Wuppertal angefordert und für die Weiterverarbeitung im Rahmen der Abschlussarbeit ausgehändigt. Verkehrszählungen wurden durch die Stadt Wuppertal in den folgenden Zeiträumen durchgeführt:

<b>Donnerstag</b>	<b>22.02.2018:</b>	<b>00:00 - 24:00 Uhr</b>
<b>Samstag</b>	<b>24.02.2018:</b>	<b>00:00 - 24:00 Uhr</b>
<b>Sonntag</b>	<b>25.02.2018:</b>	<b>00:00 - 24:00 Uhr</b>

Die Messung der Anzahl der Verkehrsteilnehmer je Fahrspur wurde in einem Intervall von 15 Minuten pro Detektor gespeichert. Diese wurde laut Stadt Wuppertal

mit der installierten Induktionsschleife, welche sich in den Spuren befindet, aufgezeichnet. Die Werte und die dadurch ermittelten Spitzenzeiten der Verkehrsdaten wurden tabellarisch aufgelistet.

Die höchsten Verkehrsbelastungen wurden in folgenden Spitzenstunden festgestellt:

<b>Donnerstag</b>	Morgenspitze:	<b>07:30 - 08:30 Uhr</b>
<b>Donnerstag</b>	Nachmittagsspitze:	<b>16:30 - 17:30 Uhr</b>
<b>Samstag</b>	Spitzenstunde:	<b>12:15 - 13:15 Uhr</b>
<b>Sonntag</b>	Spitzenstunde:	<b>14:15 - 15:15 Uhr</b>

Die Spitzen wurden von der Verkehrstechnik der Stadt Wuppertal, wie oben aufgelistet, definiert. Donnerstag weist zwei Spitzen auf, einmal die Morgen- und Nachmittagsspitze, wobei die anderen Tage nur über eine Spitzenzeit verfügen.

Tabelle 2: Realdaten

Zeit	Donnerstag, 22.02.2018	Samstag, 24.02.2018	Sonntag, 25.02.2018
Morgenspitze	<b>2.797</b>	<b>878</b>	<b>253</b>
Mittagsspitzenzeit	<b>3.845</b>	<b>3.283</b>	<b>2.171</b>
Summe in 24 h	<b>48.383</b>	<b>41.199</b>	<b>25.627</b>
	Fahrzeuge	Fahrzeuge	Fahrzeuge

Am Donnerstag, den 22.02.18, sind insgesamt 48.383 Fahrzeuge über die Kreuzung Robert-Daum-Platz gefahren. Davon fuhren 2.797 Fahrzeuge zur Morgenspitze und 3.845 Fahrzeuge zur Mittagsspitze. Am Samstag, den 24.02.2018, haben 41.199 Fahrzeuge die Kreuzung genutzt, im Zuge dessen 878 Fahrzeuge in der Morgenspitze und 3.283 Fahrzeuge in der Mittagsspitze. Am Sonntag, den 25.02.2018, haben 25.627 Fahrzeuge die Kreuzung befahren, davon

253 Fahrzeuge in der Morgenspitze und 2.171 Fahrzeuge in der Mittagsspitze. Alle Zählergebnisse sind in den Anlagen hinterlegt.

Der Lageplan wurde zur Veranschaulichung in Abbildung 19 vergrößert, damit erkennbar ist, wo sich die Detektoren und Signalgruppen im Lageplan befinden, dieser wurde durch ein Lesebeispiel vereinfacht dargestellt.

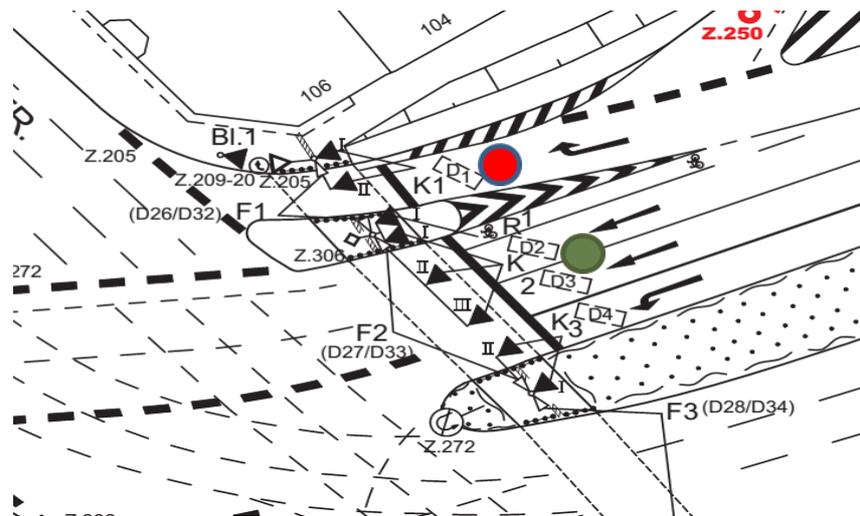


Abbildung 19: Vergrößerte Ansicht des Lageplans zur Veranschaulichung der betroffenen Straßen (Stadt Wuppertal)

Lesebeispiel:

● = K1 und D1: Signalgruppe K1 und Fahrspur D1

● = K2 und D2D3: Signalgruppe K2 und Fahrspuren D2D3

Im Signallageplan ist jeder einzelne Detektor mit dem Buchstaben D und seiner Zahl definiert sowie der ihr zugeordneten Signalgruppe. Jede Signalgruppe ist eine eigene Ampelschaltung mit einer spezifischen Dauer und einem Detektor zugeordnet worden. Zur Signalgruppe K1 gehört Detektor D1. Detektor D1 zeigt die Anzahl der Fahrzeuge, die vom Ausgangspunkt Osten starten und zum Endpunkt Norden hinfahren. Die Gesamtfahrzeuganzahl von D1 beträgt jeweils 414 Fahrzeuge in der Morgenstunde, die von 7:30 Uhr – 8:30 Uhr andauert, und 685 Fahrzeuge zur Nachmittagsspitze, die von 16:30 Uhr – 17:30 Uhr festgehalten ist. Detektor D2 und D3 sind zwei separate Fahrspuren, welche in dieselbe Richtung führen und zur Signalgruppe K2 zugeordnet sind. Des Weiteren wurden diese Detektoren zur Vereinfachung in D2D3 zusammengeführt. Der Detektor D4 ist mit der Signalgruppe K3 verknüpft, dieser zeigt Fahrzeuge, die sich vom

Ausgangspunkt Osten annähern und zum Endpunkt Süden fahren. Diese Fahrspur befahren in der Morgenstunde 214 Fahrzeuge und 288 Fahrzeuge in der Nachmittagsspitze. Über die Signalgruppe K4 werden Fahrzeuge zugeordnet, die von Süden starten und im Norden enden. Diese überfahren die Detektoren D5D6 mit jeweils 303 Fahrzeugen in der Morgenspitze und 449 Fahrzeugen in der Nachmittagsspitze. Fahrzeuge, die über D7 fahren, werden über die Signalgruppe K5 geschaltet. Diese Fahrzeuge kommen aus dem Süden mit dem Endziel im Westen. Diese umfassen zur Morgenstunde 114 Fahrzeuge und 127 Fahrzeuge in der Nachmittagsstunde. Alle Werte sind in Tabelle 3 aufgelistet. Die Spalte „Fahrzeugfarbe“ veranschaulicht die verwendete farbliche Fahrzeugdarstellung in der späteren SUMO-Simulation. Aus der Farbe des Fahrzeugs kann in der Simulation der Startpunkt abgeleitet werden.

Tabelle 3: Spitzenzeitbelastung pro Signalgruppe innerhalb 1 Std.

Signalgruppe	Detektoren	Belastung 7:30 Uhr – 8:30 Uhr	Belastung 16:30 Uhr - 17:30 Uhr	Fahrzeug -farbe
K1	D1 	414	685	grün
K2	D2D3 	417	612	grün
K3	D4	214	288	grün
K4	D5D6	303	449	gelb
K5	D7	114	127	gelb
K6	D8	128	206	rot
K7	D10D11	369	555	rot
K8	D12	125	238	rot
K9	D13	358	364	blau
K10	D14D15	355	317	blau
K1 - K10	D1 - D1415	SUMME 2.797	SUMME 3.845	

In Abbildung 20 ist der Signalplan SiPI 17 der Stadt Wuppertal zu sehen, dieser beschreibt ein Festzeitprogramm der Lichtsignalanlagen am Robert-Daum-Platz in Wuppertal. Das Festzeitprogramm hat eine Umlaufzeit  $t_u$  von 90 Sekunden. Geschaltet wird SiPI 17 in der Morgenstunde von 6:00 – 8:25 Uhr. FA beschreibt den Freigabeanfang, FE das Freigabeende und TF die gesamte Freigabezeit, die

sich innerhalb einer Umlaufzeit an der jeweiligen Signalgruppe befinden. Durch die Subtraktion von FE mit FA bildet sich TF. Im SiPI 17 überschneiden sich die Signalgruppen K4 mit K5, die Überschneidung dauert 6 Sekunden an, von Sekunde 11 bis Sekunde 17. K4 hat dabei eine längere Freigabezeit als K5 mit 14 Sekunden mit einer Freigabezeit von 8 Sekunden. Unmittelbar vor einem Freigabeanfang hat die Ampel immer die Farbfolge Rot-Gelb für eine Sekunde, diese ist in Abbildung 21 dargestellt. Signalgruppe K3 überschneidet sich mit K8 in der ersten Sekunde der Umlaufzeit. K3 hat eine Freigabezeit von neun Sekunden, startend von Sekunde 82 bis zum Ende der Umlaufzeit bis hin zur Sekunde eins der Umlaufzeit. K8 hat eine Freigabezeit von 10 Sekunden, diese fängt in Sekunde 85 an und endet bei Sekunde fünf. Die Signalgruppe K9 überschneidet sich mit der Signalgruppe K10, wobei K9 in Sekunde 27 seine Freigabezeit beginnt und in Sekunde 52 endet und K10 in Sekunde 29 bis zur Sekunde 51. Das bedeutet, dass die Freigabezeit von K9 zwei Sekunden vorher beginnt und eine Sekunde später als K10 endet. Die Übergangszeit wird im Signalplan mit dem Symbol (siehe Abbildung 22) gekennzeichnet, diese ist aufgrund der zulässigen Geschwindigkeit von 50 km/h auf 3 Sekunden festgelegt. Nach dieser Zeit erscheint immer die Sperrzeit. Weiter überschneiden sich K2 und K7 in ihrer Freigabezeit in der Sekunde 62 bis Sekunde 77. Unterdessen fängt K2 schon in Sekunde 57 an und endet bei Sekunde 79. Die Signalgruppen K1 und K6 sind beide Bypässe, diese sind mit Zwei-Phasen-Ampeln ausgestattet. Zwei-Phasen-Ampeln verfügen nur über rotes und gelbes Licht. In der RiLSA sind solche Ampeln mit der Farbfolge dunkel-gelb-rot-dunkel beschrieben, nur diese Ampeln haben eine Übergangszeit von 5 Sekunden. K1 schaltet sich ab Sekunde 28 aus bis Sekunde 84. Das ist eine Freigabe von 56 Sekunden. In dieser Zeit regeln auf D1 die Verkehrszeichen den Verkehr.

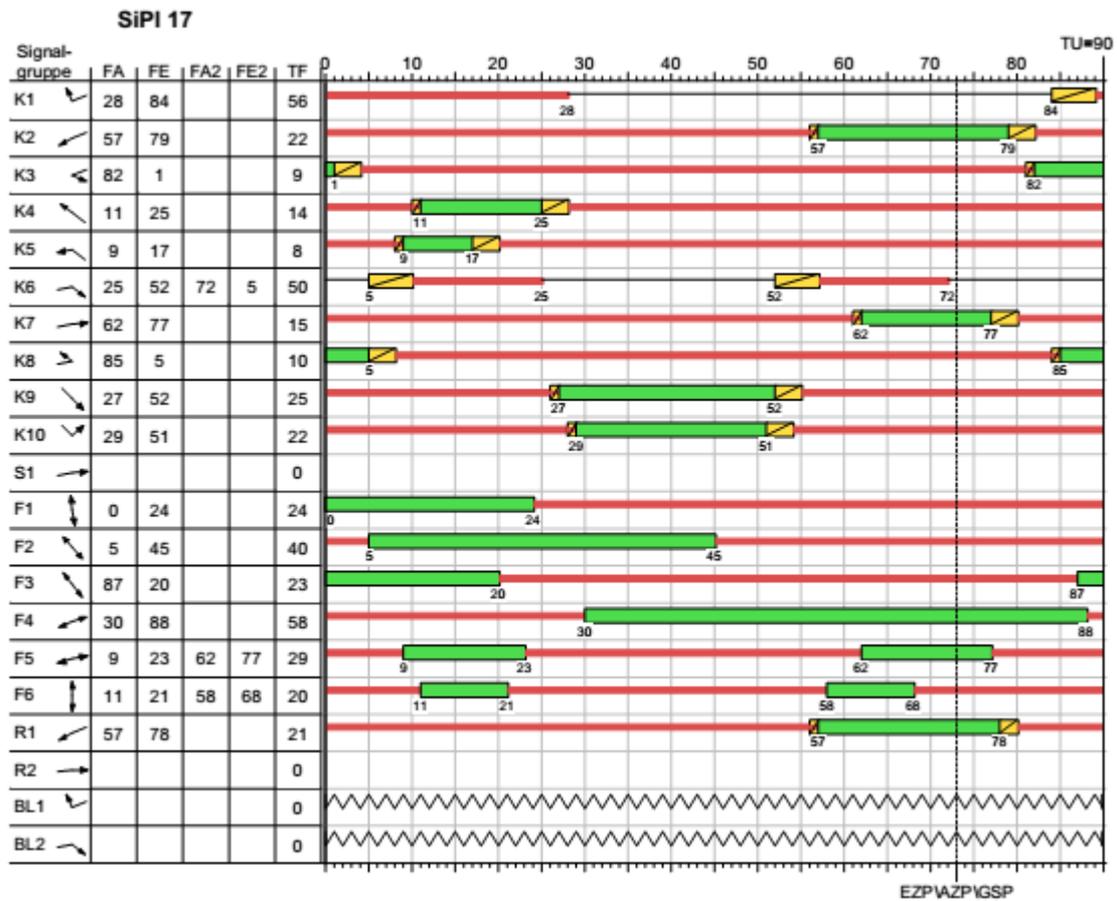


Abbildung 20: Signalplan SiPI 17, 6:00 Uhr – 8:25 Uhr (Stadt Wuppertal)

Das Festzeitprogramm SiPI 18 wird in Abbildung 21 dargestellt und zeigt die Schaltung der Lichtsignalanlagen am Robert-Daum-Platz in Wuppertal. Diese wird Montag - Donnerstag von 14:00 – 20:00 und freitags ab 11 Uhr geschaltet.

Der Freigabeanfang der Signalgruppe K4 und K5 beginnt bei beiden ab Sekunde eins. K4 hat eine Freigabezeit von 17 Sekunden und K5 eine Freigabezeit von 11 Sekunden. K9 beginnt mit seiner Freigabe in Sekunde 22, dieser überschneidet sich bis Sekunde 26 mit K10, welcher eine Freigabezeit von 15 Sekunden hat und in Sekunde 41 endet. K9 wechselt in Sekunde 42 zur Übergangszeit. Signalgruppe K2 hat einen Freigabeanfang in Sekunde 46, seine Freigabe endet in Sekunde 65. Diese Signalgruppe überschneidet sich mit Signalgruppe K7, welche in Sekunde 52 anfängt und in Sekunde 66 endet. K3 und K8 fangen beide mit ihrer Freigabe in Sekunde 71 an. Signalgruppe K8 endet in Sekunde 85, wobei K3 eine Sekunde länger Freigabe enthält.

In diesem Schaltplan hat die Signalgruppe K5 die niedrigste Freigabezeit von 11 Sekunden. Alle Signalgruppen haben eine Phase außer Signalgruppe K6 mit zwei Phasen. Die längste Freigabezeit im Signalplan 18 hat die Signalgruppe K1 mit 58 Sekunden. Die Fußgängerschaltungen F1 bis F6 und die Radfahrschaltung R1 werden nicht betrachtet.

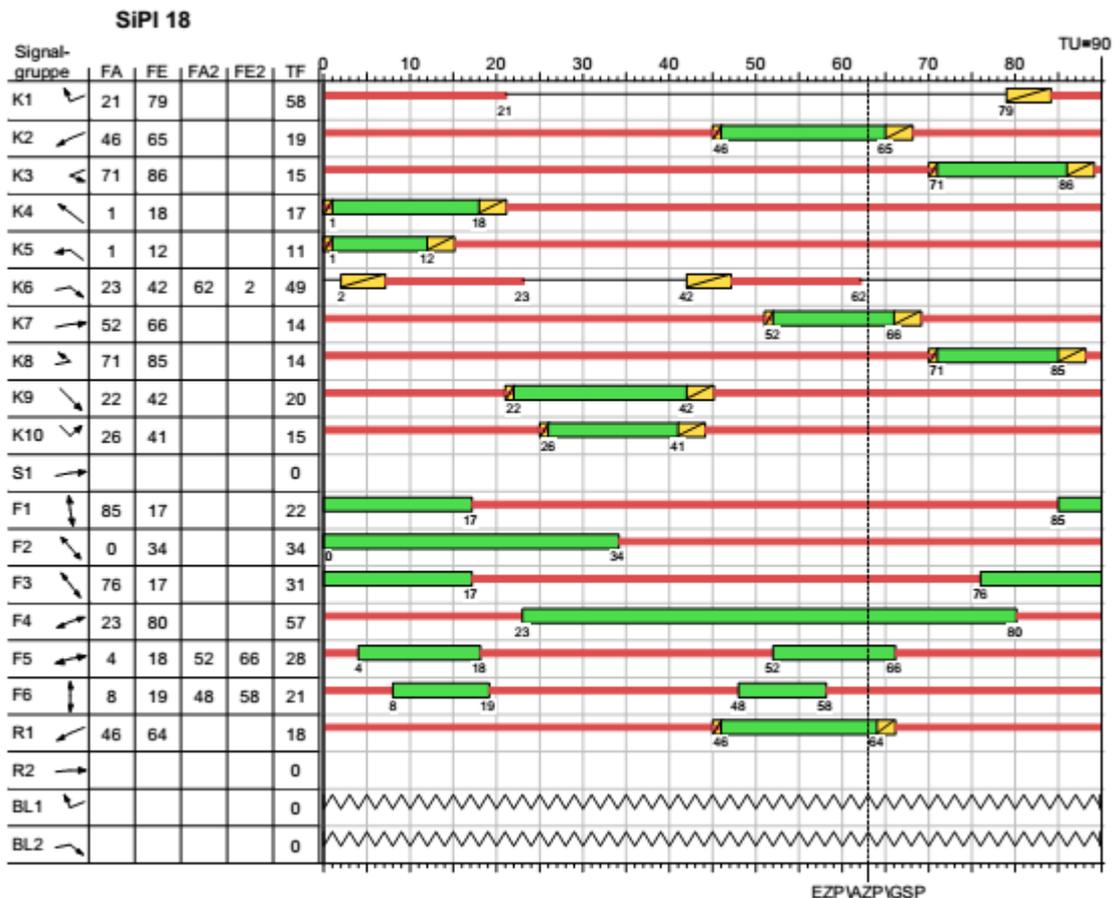


Abbildung 21: Signalplan SiPI 18, Schaltung 14:00 Uhr - 20:00 Uhr (Stadt Wuppertal)

Die in den Festzeitprogrammen verwendeten Rot-Gelb / Gelb Symbole werden in Abbildung 22 und 23 vergrößert dargestellt und erläutert. Die Rot-Gelb-Phase beträgt jeweils eine Sekunde und die Gelb-Phase drei Sekunden.



Abbildung 22:  
Übergangszeit rot-gelb



Abbildung 23:  
Übergangszeit gelb

In Abbildung 24 wird die Zwischenzeitmatrix der zu untersuchenden Kreuzung dargestellt. In der Abbildung sieht man, wie viele Sekunden nach einem einfahrenden Fahrzeug seiner jeweiligen Signalgruppe sein Kontrahent warten muss, bis die Fahrspur geräumt ist und seine Ampel sich grün schaltet. In den Feldern, wo ein Minus ist, sind Signalgruppen, welche gleichzeitig fahren können und sich dabei nicht kreuzen. In den Feldern, wo Zahlen sind, befinden sich Signalgruppen, die sich kreuzen und nicht gleichzeitig fahren dürfen. Die Zahlen beschreiben die Zwischenzeiten in Sekunden.

		EINFAHREND																					
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	S1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	R1	R2	BL1	BL2	
RÄUMEND	K1	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-
	K2	-	■	-	4	4	-	-	6	7	6	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-
	K3	-	-	■	4	5	-	5	-	4	4	-	-	4	-	-	8	-	-	-	-	-	-
	K4	-	8	6	■	-	-	4	7	-	4	-	-	-	-	5	-	-	-	7	-	-	-
	K5	-	9	5	-	■	-	5	9	10	9	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-
	K6	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-
	K7	-	-	5	8	6	-	■	-	4	4	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-
	K8	-	5	-	6	4	-	-	■	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-
	K9	-	4	7	-	6	-	10	5	■	-	-	-	-	-	-	10	-	-	4	-	-	-
	K10	-	5	9	10	6	-	11	5	-	■	-	-	-	12	-	-	-	-	4	-	-	-
	S1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	F1	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	F2	-	12	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	12	-	-	-
	F3	-	-	-	-	-	-	11	-	-	9	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-	-
	F4	-	-	-	11	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-
	F5	-	-	5	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-
	F6	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-
	R1	-	-	-	4	-	-	-	7	11	10	-	-	-	4	-	-	-	-	■	-	-	-
	R2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-
	BL1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-
	BL2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■
	min. Frei		6	10	8	8	8	6	8	8	8	8	-	6	6	6	6	6	6	6	-	-	-

Abbildung 24: Zwischenzeitmatrix Robert-Daum-Platz (Stadt Wuppertal)

### 5.3 Verwendeter Datensatz für die Implementierung von SUMO

Die Daten der Verkehrstechnik von der Stadt Wuppertal wurden als Einstellwerte für die SUMO-Simulation verwendet, um eine möglichst realitätsnahe Simulation zu ermöglichen. Aus Tabelle 3 wurde die Nachmittagsspitze am Donnerstag, den 22.02.2018, von 16:30 – 17:30 Uhr mit einer Verkehrsteilnehmersumme von 3.845 Fahrzeugen sowie die Morgenspitze am Donnerstag, den 22.02.2018, von 7.30 Uhr – 8.30 Uhr mit einer Summe von 2.797 Fahrzeugen eingespielt. Tabelle 3 zeigt eine

genaue Auflistung beziehungsweise die genaue Anzahl der zu simulierenden Fahrzeuge pro Signalgruppe innerhalb einer Stunde. Die oben dargestellten Daten wurden in SUMO mit der entsprechenden Lichtsignalanlagensteuerung eingestellt.

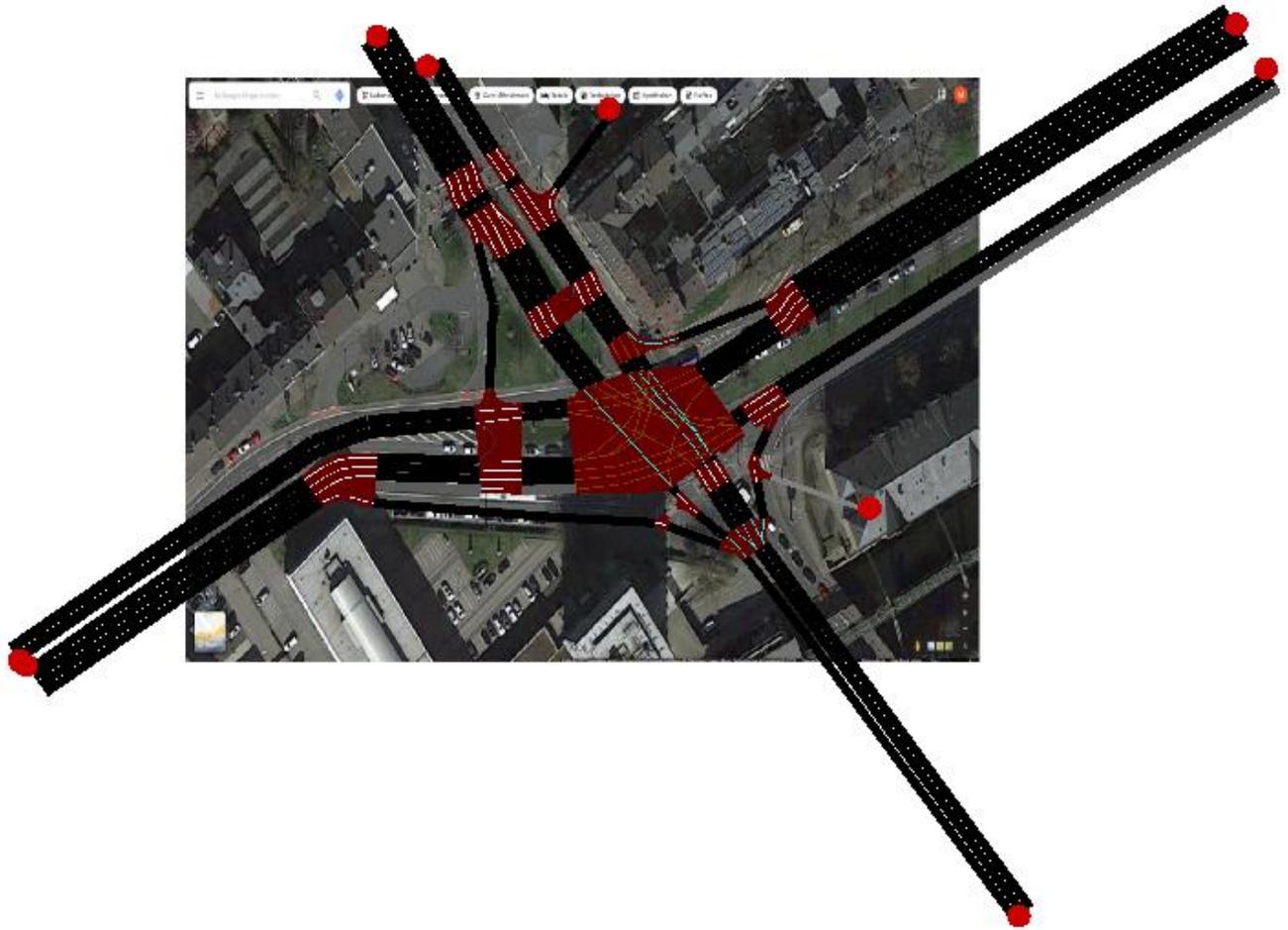


Abbildung 25: Straßennetzerstellung über SUMO am Robert-Daum-Platz (eigene Darstellung)

## **6 Simulation und Auswertung der Verkehrssituation**

In diesem Kapitel werden die Verkehrssituationen von 2018 mit der Software SUMO konfiguriert und die Geometrie Kreisverkehr modelliert. Zuerst wird die Analyse von SUMO beschrieben. Weiter erfolgen die computergestützten Auswertungen und Vergleiche. Die Szenarien werden ausgewertet und miteinander verglichen. Anschließend werden Lösungsvorschläge genannt.

### **6.1 Analyse der Simulation**

Ursprünglich sollte die untersuchte Kreuzung direkt über den Kartendienst OpenStreetMap in die Simulationssoftware SUMO übernommen werden. Bei der automatischen Übertragung ist aufgefallen, dass einige Netzdaten nicht mit der tatsächlichen Netzstruktur übereingestimmt haben. So wurden etwa die Richtungspfeile der Abbiegemöglichkeit an einigen Fahrbahns Spuren fehlerhaft übertragen. Diese und ähnliche Fehlerquellen in der Übertragung wurden manuell über Netedit korrigiert. Dadurch ist gewährleistet worden, dass die Simulation unter realen Bedingungen durchgeführt werden konnte.

Nach einigen Experimenten ist aufgefallen, dass auch die über Netedit übertragenen Straßenabschnitte ungenau aufgeteilt waren und dies nicht zu einer optimalen Übersichtlichkeit, sondern zu einer Komplizierung des Straßennetzes führte. Manche Teile des Straßennetzes sind nicht der realen Situation entsprechend aufgeteilt worden. Dies führte zu Unregelmäßigkeiten sowie falscher Darstellung des Straßenverkehrsflusses. So wurden einige Autos länglicher dargestellt, dadurch kam es zu einer Verzerrung des Straßenbildes. Die Korrektur eines einzelnen Straßenabschnittes erwies sich wesentlich komplexer als ursprünglich angenommen. Die Straßenabschnitte waren durch eine Verschachtelung der Straßenverknüpfungen unübersichtlich. Aus diesem Grund wurde ein manuelles Straßennetz erstellt, das in dieser Hinsicht deutlich weniger anfällig für Fehler ist. Anhand einer Satellitenaufnahme der Kreuzung wurden die Straßennetze auf der Grafik manuell nachgebildet. Dies ist in Abbildung 25 zu sehen. Damit ist die Netzstruktur der Route erschaffen worden. Anschließend wurden über das Tool Demand Fahrzeuge eingepflegt und deren Route genau definiert. Anhand von Tabelle 3 wurden der Startpunkt und Endpunkt für jeden

einzelnen Detektor festgelegt sowie die Anzahl der Fahrzeuge. Dies geschah auch mit Szenario 2, wobei hier die Fahrzeuganzahl an die Tabelle 3 zur Nachmittagsspitze angepasst wurde. Dabei war entscheidend, in welche Richtung mit welcher Anzahl an Fahrzeugen und welcher Geschwindigkeit pro Stunde die ausgewählte Route befahren wird. Zur eindeutigen Unterscheidung der erstellten Fahrzeuge hat jede Richtungsgruppe unterschiedliche Farben erhalten. Die Fahrzeuge, die fahren, von Osten nach Westen und nach Süden haben die Farbe Grün erhalten. Fahrzeuge, die von Norden starteten, haben die Farbe Blau erhalten. Von Westen beginnende Fahrzeuge sind rot gekennzeichnet worden. Von Süden startende Fahrzeuge sind gelb kenntlich gemacht worden. Darüber hinaus wurden die Lichtzeichenanlagen per Hand eingestellt (siehe Quellcode in den Anlagen), sodass die Signalzeitpläne der Ampeln ebenfalls in das Simulationsszenario aufgenommen und ausgegeben werden konnten, damit eine realitätsnahe Situation bewertet werden kann. In den Signalgruppe K1 und K6 wurde darauf geachtet, dass diese die Vorfahrt gewähren in der Zeit, in der ihre Ampel dunkel geschaltet sind. Nach erfolgreichem Einstellen wurden beide Signalzeitpläne SiPI 17 und SiPI 18 und ihrer höchsten Fahrzeuganzahl simuliert, die ausgegebenen Daten wurden verglichen.

Die ausgegebenen Werte wurden durch die jeweiligen Fahrzeugrouten ausgewertet. Anhand der gewonnenen Daten wie „timeLoss“, was den Zeitverlust je Detektor beschreibt, wurden die stärksten durchschnittlichen Zeitverluste gesondert betrachtet. Alle Zeitverluste sind über eine Excel Tabelle aufgelistet worden. Die Summe für die komplette Kreuzung insgesamt wurde dadurch gebildet. Um eine Verbesserung der durchschnittlichen Zeitverluste insgesamt zu ermöglichen, wurde der höchste durchschnittliche Zeitverlustwert untersucht. Ihre zuständige Signalgruppe wurde modifiziert, indem die Freigabezeit um eine Sekunde erhöht wurde. Um die Umlaufzeit von 90 Sekunden beizubehalten, wurde im Gegenzug um eine Sekunde einer anderen Signalgruppe, deren Detektor einen geringen Zeitverlust auswies, verringert. Dabei wurde die Unverträglichkeitsmatrix berücksichtigt, um dessen Kontrahent nicht zu kreuzen. Diese Vorgehensweise wurde so lange durchgeführt, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis aller Betroffenen entstand. Die Fahrzeuganzahl in den beiden Lichtsignalprogrammen wurde beibehalten. Einmal in der höchsten Spitze der Morgenspitze mit 2.797 Fahrzeugen in SiPI 17 und in der höchsten Nachmittagszeit mit 3.845 Fahrzeugen in SiPI 18.

Diese Zeitverluste wurden miteinander verglichen und bewertet. Das SiPI- 17 und 18 gilt heute noch. Obwohl die Signalpläne unter Berücksichtigung von Fußgängern geschaltet werden, wurden Fußgänger in der Simulation nicht betrachtet, da der von der Stadt Wuppertal zur Verfügung gestellte Datensatz keine Daten zu der Anzahl der Fußgänger enthielt. Als nächstes wurde im Rahmen der Simulation eine neue Geometrie getestet, es wurde die Knotenpunktart Kreisverkehr mit zwei Spuren ohne Signalgeber eingeführt. Zwei Szenarien wurden hier modelliert. Auch hier wurde zwischen den beiden bekannten Anzahlen der Fahrzeuge unterschieden.

## 6.2 Computergestützte Simulationsauswertung Kreuzung

In diesem Unterkapitel werden die Simulationsauswertungen der Kreuzung Robert-Daum-Platz in Wuppertal vorgestellt. Zwei Szenarien werden ohne Änderungen der Realdaten durchgeführt, diese sind hierbei die übermittelten Daten der Stadt Wuppertal, um einen ersten Einblick der Verkehrslage zu erhalten. Beide Szenarien sind durch die Simulation der Kreuzung Robert-Daum-Platz durchgeführt worden, welche die reale Lage widerspiegeln soll. Das erste Szenario fand jeweils mit 2.797 Fahrzeugen und das zweite mit 3.845 Fahrzeugen statt. Die Zahlen sind anhand der Verkehrszählung von 2018 und ihrer zugehörigen Ampelschaltungen implementiert worden. In Abbildung 26 wird ein Ausschnitt der Simulation gezeigt.



Abbildung 26: Simulationsdarstellung Robert-Daum-Platz (SUMO, eigene Darstellung)

Nach der Simulation sind über die erzeugten TripInfo Skripte folgende Ergebnisse zustande gekommen. Die Tabelle 4 zeigt die Bilanz des timeLoss beziehungsweise des durchschnittlichen Zeitverlustes mit der Signalschaltung SiPI 17 und 2.797 Fahrzeugen binnen einer Stunde.

Tabelle 4: Auswertung 1.Szenario mit 2.797 Fahrzeugen und SiPI 17

Signalgruppe	Detektor	Gesamt-Zeitverlust in Sek.	Durchschnittlicher Zeitverlust pro Fahrzeug in Sek.
K1	D1	7403,26	17,88
K7	D10D11	14053,96	38,09
K8	D12	5179,31	41,43
K9	D13	11451,74	31,99
K10	D14D15	11212,59	31,58
K2	D2D3	50213,82	120,42
<b>K3</b>	<b>D4</b>	<b>123963,2</b>	<b>579,27</b>
K4	D5D6	11346,41	37,45
K5	D7	5070,7	44,48
K6	D8	849,07	6,63
Gesamt SUMME		240744,06	949,22
Durchschnittlich		24074,41	94,92

Im Szenario 1 ist durch die Auswertung zu erkennen, dass im Durchschnitt 94,92 Sekunden pro Fahrzeug verloren gehen. Die Fahrzeuge, die durch den Detektor D4 fahren, haben den höchsten Zeitverlust mit durchschnittlich 579,27 Sekunden pro Fahrzeug. Der zweite relevante Zeitverlust in Szenario 1 ist in Fahrspur D2D3 mit 120,42 Sekunden zu sehen. Hierbei ist der höchste Wert für den Gesamt-timeLoss mit 50213,82 Sekunde zu sehen, dieser kam zustande durch die Summe der Zeitverluste von 417 Fahrzeugen, die durch den Detektoren D2D3 fahren. D2D3 ist abhängig von Signalgruppe K2, welche eine Freigabezeit von 22 Sekunden hat. Der Detektor D8 profiliert sich durch seine Ampelschaltung mit einem timeLoss von 6,63 Sekunden durchschnittlich pro Fahrzeug.

## 2.Szenario

Das zweite Szenario wird mit dem gleichen Straßennetz, einer Fahrzeuganzahl von 3.845 und der Signalschaltung SiPI 18 durchgeführt. Tabelle 5 zeigt die relevanten Ergebnisse für dieses Szenario.

Tabelle 5: Auswertung 2.Szenario mit 3.845 Fahrzeugen und SiPI 18

Signalgruppe	Detektor	Gesamt-Zeitverlust in Sek.	Durchschnittlicher Zeitverlust pro Fahrzeug in Sek.
K1	D1	10565,6	15,42
<b>K7</b>	<b>D10D11</b>	<b>117188,66</b>	<b>211,15</b>
K8	D12	29627,45	124,49
K9	D13	17417,79	47,85
K10	D14D15	11971,37	37,76
K2	D2D3	25083,32	40,99
K3	D4	22204,67	77,10
K4	D5D6	16522,3	36,80
K5	D7	6906,6	54,38
K6	D8	11752,07	57,05
Gesamt SUMME		269239,83	703
Durchschnittlich		26923,98	70,3

Die Gesamtsumme in Szenario 2 ist die Summe der durchschnittlichen Zeitverluste aller Detektoren von 703 Sekunden pro Fahrzeug, die verloren gegangen ist. Das entspricht durchschnittlich 70,3 Sekunden pro Fahrzeug. Hier ist auffällig, dass D10D11 den höchsten Zeitverlust mit 211,15 Sekunden verursacht. Als zweithöchster Zeitverlust folgt D12 mit einem timeLoss von 124,49 Sekunden. Der niedrigste durchschnittliche Zeitverlust pro Fahrzeug ist auf die Signalgruppe K1 zurückzuführen mit 15,42 Sekunden.

### 6.2.1 Vergleich der Signalpläne

Beide Schaltpläne haben an ihren Signalgruppen unterschiedliche Laufphasen, Freigabe, Übergang und Sperrzeiten. Diese sind durch den jeweiligen Signalplan genau beschrieben. Der erste Ablauf der Ampelschaltung SiPI 17 mit 2.797 Fahrzeugen hat eine Summe durchschnittlicher Zeitverluste pro Fahrzeug, in Bezug auf alle Detektoren von 949,22 Sekunden nach der Simulation ausgegeben. Das bedeutet, dass jedes Fahrzeug im Durchschnitt 94,92 Sekunden im Gegensatz zum optimalen Wert verloren hat.

Die Ampel Schaltung SiPI 18 mit der Fahrzeuganzahl 3.845 hat einen Wert von insgesamt 703 Sekunden gezeigt. Durchschnittlich verliert in diesem Fall jedes Fahrzeug 70,3 Sekunden an der Kreuzung. Anhand der Simulationsergebnisse im Vergleich wird sichtbar, dass das Festzeitprogramm SiPI 17 zum Festzeitprogramm

SiPI18 eine Differenz von 24,62 Sekunden in den Zeitverlusten aufweist. Anhand der Auswertung der Simulation kann abgeleitet werden, dass ein Verkehrsteilnehmer mit der Ampelschaltung SiPI 18, welches nachmittags geschaltet wird, um 24,62 Sekunden schneller voran kommt als mit der SiPI 17 Schaltung, welche vormittags geschaltet wird.

### 6.3 Computergestützte Simulationsauswertung Kreisverkehr

In diesem Abschnitt werden zwei Szenarien im Kreisverkehr dargestellt, die für diese Thesis eigens erstellt worden sind. Die Szenarien 3 und 4 werden in den Knotenpunkt Kreisverkehr mit 2-Spuren gewählt mit den bekannten Fahrzeugeinheiten 2.797 und 3.845 mit den gleichen Verkehrseinstellungen mit der Software SUMO simuliert.

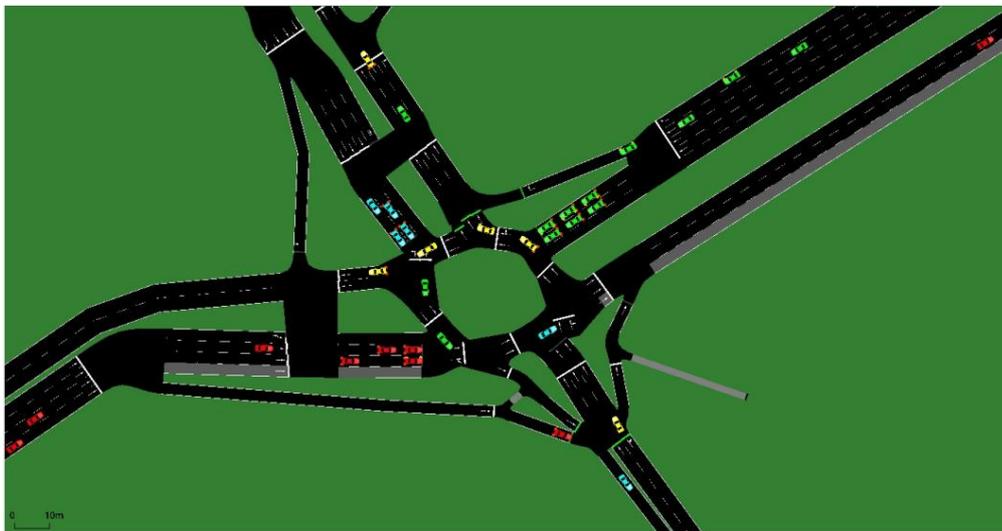


Abbildung 27: Kreisverkehr am Robert-Daum-Platz mit 2 Spuren

In Szenario 3 wurden 2.797 Fahrzeuge eingepflegt. Die Fahrzeugfarben der jeweiligen Fahrtrichtungen wurden beibehalten. So wurden auch hier die gleichen Fahrziele berücksichtigt.

Tabelle 6: 3.Szenario Kreisverkehr mit 2.797 Fahrzeugen

Signalgruppe	Detektor	Gesamt-Zeitverlust in Sek.	Durchschnittlicher Zeitverlust pro Fahrzeug in Sek.
K1	D1	1302,75	3,15
K7	D10D11	6698,91	18,15
K8	D12	3580,93	28,65
K9	D13	27205,03	75,99
<b>K10</b>	<b>D14D15</b>	<b>32330,31</b>	<b>91,07</b>
K2	D2D3	6014,76	14,42
K3	D4	3301,21	15,43
K4	D5D6	8122,46	26,81
K5	D7	4617,46	40,50
K6	D8	881,75	6,89
Gesamt SUMME		94055,57	321,06
Durchschnittlich		9405,56	32,11

Die Gesamtsumme beträgt innerhalb des timeLoss 321,06 Sekunden. Der durchschnittliche Zeitverlust pro Fahrzeug entspricht hier 32,11 Sekunden. Der höchste timeLoss ist in Signalgruppe K10 ersichtlich mit 91,07 Sekunden. Der niedrigste timeLoss zeigt K1 mit 3,15 Sekunden.

#### Szenario 4

Im Szenario 4 sind 3.845 Fahrzeuge eingefügt worden. Die Auswertung jedes Detektors ist in Tabelle 7 ersichtlich.

Tabelle 7: 4.Szenario Kreisverkehr mit 3.845 Fahrzeugen

Signalgruppe	Detektor	Gesamt-Zeitverlust in Sek.	Durchschnittlicher Zeitverlust pro Fahrzeug in Sek.
K1	D1	65195,03	95,18
K7	D10D11	105980,68	190,96
K8	D12	55149,27	231,72
K9	D13	74721,47	205,28
K10	D14D15	90082,07	284,17
K2	D2D3	106419,43	173,89
K3	D4	54282,31	188,48
K4	D5D6	134390,34	299,31
<b>K5</b>	<b>D7</b>	<b>44644,49</b>	<b>351,53</b>
K6	D8	42238,02	205,04
Gesamt SUMME		773103,11	2225,55
Durchschnittlich		77310,31	222,56

Der durchschnittliche Zeitverlust pro Fahrzeug beträgt 222,56 Sekunden. Der höchste durchschnittliche Zeitverlust pro Fahrzeug ist in Detektor D7 zu sehen, dieser beträgt 351,53 Sekunden. Nur Signalgruppe K1 weist hier einen zweistelligen Zeitverlust-Wert auf, alle weiteren haben einen dreistelligen hohen Zeitverlust.

### **6.3.1 Vergleich mit dem Kreisverkehr**

Bei der ersten Simulation mit dem Knotenpunkt Kreisverkehr mit 2.797 Fahrzeugen wurde festgestellt, dass die durchschnittliche Verlustzeit 32 Sekunden pro Fahrzeug beträgt. Der Verkehrsfluss zeigte sich bei diesem Szenario sehr ausgewogen und gleichzeitig flüssig. Bei der zweiten Simulation mit 3.845 Fahrzeugen im Kreisverkehr wurde dagegen ein enorm hoher Zeitverlust ermittelt. In diesem Szenario konnte erkannt werden, dass ein Fahrzeug durchschnittlich 222,55 Sekunden verliert. In Szenario 4 kann ebenfalls beobachtet werden, dass in manchen Zeitabschnitten die Fahrzeuge sich stauten und komplett stillstanden, was zu hohen Zeitverlusten in allen Punkten führte. Ein Kreisverkehr würde laut Simulation nur zur Morgenspitze Sinn machen, da dieser den kleinsten durchschnittlichen Zeitverlust aller Szenarien besitzt. Dabei ist hier zu erwähnen, dass keine Fußgänger oberirdisch berücksichtigt worden sind. Beide Kreisverkehr-Szenarien könnten realisiert werden, indem Fußgänger durch den damaligen Fußgängertunnel die Kreuzung unterirdisch queren. Szenario 4 hat den höchsten durchschnittlichen Zeitverlust aller Szenarien. Dabei kann aus der SUMO-Simulation geschlussfolgert werden, dass ein 2-Spuriger Kreisverkehr ohne Lichtsignalanlagen nicht zu empfehlen ist. Aufgrund der Ergebnisse des 4.Szenarios und im Anbetracht des stetig wachsenden Verkehrsaufkommens würden Fahrzeuge durch diesen Knotenpunkt mehr Zeit verlieren.

## **6.4 Methodik**

Um den Verkehrsfluss an der Kreuzung zu verbessern, ist es notwendig gewesen, systematisch an das Problem heranzugehen. Um die problematischen Stellen zu finden, wurden bereits im vorherigen Kapitel die unterschiedlichen Szenarien betrachtet und bewertet. Nun müssen im weiteren Schritt Überlegungen stattfinden, wie diese verbessert werden können, um den timeLoss so gering wie möglich zu halten. Durch den timeLoss wird die Optimal-Zeit, also die SOLL-Zeit, von der

tatsächlichen Zeit, IST-Zeit, unterschieden. Dabei sind die gegebenen Werte größer null und zeigen deutliche Differenzen. So können einige Werte mehrere hundert Sekunden betragen, während andere wenige Sekunden betragen können. Diese sind aber ein guter Indikator, um die besonders betroffenen Positionen herauszufiltern. Diese werden auch in der Simulation widergespiegelt. Selbst nach mehreren Durchläufen zeigt sich ein wiederholendes Muster, sodass bestimmte Detektoren als problematisch einzustufen sind. Um an das Problem heranzugehen, werden zwei Faktoren benötigt. Zuerst wird die Gesamtanzahl der Fahrzeuge mit einem weiteren elementaren Faktor, der Umlaufzeit, benötigt. Damit soll bestimmt werden, wie viele Fahrzeuge im Schnitt pro Detektor jeweils für jede Umlaufzeit die Kreuzung befahren müssen, um eine Annäherung der Realdaten zu schaffen und einen optimalen Verkehrsfluss zu gewährleisten. Die Rechnung ist dabei

$$\frac{\text{Anzahl der Fahrzeuge}}{3600s} * 90s$$

Somit ergibt sich die durchschnittliche Anzahl der Fahrzeuge für jede Umlaufzeit, die die Kreuzung im Schnitt überqueren müssen. Dabei soll der Wert den SOLL-Zustand der Fahrzeuge ergeben, die erreicht werden müssen. Im Weiteren muss der IST-Zustand ermittelt werden. Dieser wird anhand der Simulation wiedergegeben. Es kann über die Simulation eingesehen werden, wie viele Fahrzeuge für jede Umlaufzeit hindurchfahren müssen. Ist der Wert des IST-Zustandes höher als der des SOLL-Zustands kann davon ausgegangen werden, dass der Detektor einen sehr geringen timeLoss besitzt. Gleichzeitig kann daraus geschlossen werden, dass es zu einer geringen Wartezeit der Fahrzeuge kommt. Hierbei kann eine erste Annahme getätigt werden. Die Annahme lautet, dass die Ampelphase für diesen Detektor zu lang geschaltet ist und verkürzt werden kann. Das andere Szenario wäre, wenn gilt, dass der IST-Zustand geringer als der SOLL-Zustand ist. Dadurch müssen mehr Fahrzeuge die Ampelphase durchqueren, als es mit der aktuellen Ampelphase möglich ist. In diesem Szenario staut sich der Verkehr und es kommt zu längeren Wartezeiten sowie zu einem höheren timeLoss des jeweiligen Detektors. Die zweite Annahme lautet also, bei Detektoren mit einem kürzeren IST-Zustand als der SOLL-Zustand gilt, dass die Ampelphase für den Detektor zu kurz geschaltet wäre und diese verlängert werden müsste. Das dritte Szenario gilt, wenn der IST-Zustand mit dem SOLL-Zustand identisch wäre. Das

heißt, dass die Anzahl von Fahrzeugen, welche die Kreuzung überqueren, im Durchschnitt mit der Anzahl der Fahrzeuge, welche die Ampel überqueren, übereinstimmt. Die dritte Annahme lautet damit, dass die Ampelphase des Detektors nicht verändert werden darf. So können im weiteren Verlauf unter den drei Annahmen verschiedene Zeiten umgeschichtet und umverteilt werden, sodass der Verkehrsfluss verbessert werden kann. Dabei werden zuerst die höchsten Zeitverluste mit den geringsten Zeitverlusten verglichen. Hierbei gilt es noch weiter zu berücksichtigen, ob diese im Konflikt zueinanderstehen. Um die Zwischenzeiten nicht zu verletzen, werden diese Zwischenzeiten als Unveränderliche betrachtet und nur die Ampelphase für die Fahrzeiten verändert. Somit werden keine Regelungen verletzt und selbst bei einer längeren Ampelphase für einen Detektor wird die Zwischenzeit entweder um den gewonnenen oder verlorenen Faktor im Zeitintervall verschoben, aber bleibt in der Länge zum nächsten Detektor unverändert. Zur Untersuchung der Werte und einer möglichen Verbesserung wird eine Annäherung genutzt. Dabei werden Umverteilungen von 1 Sekunde betrachtet, wobei nach jeder Veränderung wieder der IST-Zustand betrachtet und mit dem SOLL-Zustand verglichen wird. Diese Iteration lässt immer von einem neuen Ausgangspunkt ausgehend eine neue Iteration beginnen. Das bedeutet, dass der Zustand immer wieder von einem neuen Startpunkt beurteilt und dadurch Schlüsse gezogen werden können, ob die Veränderung eine positive oder negative Auswirkung zur Folge hat.

#### **6.4.1 Verbesserung**

Durch die Simulationsauswertung sollte ermittelt werden, welche Detektoren die höchsten Zeitverluste aufweisen. Anschließend sollten durch Annäherung ein verbesserter Zeitverlustwert der jeweiligen Signalgruppe und auch die Summe der Zeitverluste insgesamt gefunden werden. Die Freigabezeit der betroffenen Signalgruppen wurde dabei durch Annäherung um eine Sekunde verändert. Die Werte der Zwischenzeitmatrix sollen hierbei beibehalten und nicht verändert werden, so bleiben beispielsweise die Räumzeiten und die Zwischenzeiten ebenfalls identisch. Dazu wurde im Gegenzug die dazu nichtverträgliche Signalgruppe um eine Sekunde der Freigabezeit verkürzt. Die höchsten Zeitverluste sind in den Auswertungen rot markiert worden.

### 6.4.2 Verbesserung 1.Szenario

Das 1. Szenario wurde anhand des höchsten timeLoss und mit dem SOLL-Wert, IST-Wert verglichen. Insgesamt werden drei Änderungen vorgenommen und hier gezeigt.

In der ersten Iteration wurde Detektor D4 mit der Signalgruppe K3 aufgrund des immensen Zeitverlustes, den dieser Detektor aufweist, analysiert. Dieser wies dabei den höchsten Zeitverlust innerhalb aller Detektoren auf. Anhand der SiPI 17 Schaltung hat die Signalgruppe K3 eine Freigabezeit von neun Sekunden in seiner Umlaufzeit. Diese startet bei Sekunde 82 und endet bei Sekunde eins. Die Simulationsdauer betrug hier 4788 Sekunden (siehe Anhang) statt 3600 Sekunden. Damit dauerte die Simulation länger an, als die tatsächlichen Realdaten wiedergeben. Dies kann unterschiedliche Gründe haben, die nicht näher untersucht wurden. In der Simulation war D4 sehr auffällig, da über diesen Detektor nur vier Fahrzeuge pro Umlaufzeit über die Ampel gefahren sind. Der SOLL-Wert hingegen hat auf diesem Detektor durchschnittlich 5,35 Fahrzeuge pro Umlaufzeit betragen. Das ist eine Differenz von durchschnittlich 1,35 Fahrzeugen. Anhand des hohen timeLoss in diesem Detektor ist dieser unterfordert. D7 dagegen hat einen SOLL-Wert von 2,85 Fahrzeuge pro Umlaufzeit. Detektor D7 weist einen IST-Zustand von drei Fahrzeugen auf. Das bedeutet hier herrscht ein überforderter Zustand. Weiter darf sich Signalgruppe K3 nicht mit der Fußgängerschaltung F2 und F5 schneiden, da es sonst zu einem Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und den Fußgängern kommen könnte. Die Idee ist, durch Annäherung über Iterationen die Signalgruppe K3 um eine Sekunde ihrer Freigabe zu steigern. Dabei soll die Veränderung von D4 beobachtet werden, um eine mögliche Änderung der Gesamtzeit betrachten zu können. Die vorher geschaltete Signalgruppe K7 ist eine zu K3 nicht verträgliche Signalgruppe. Dabei ist die Zwischenzeit der Signalgruppen von der Kreuzung Robert-Daum-Platz, hier von 5 Sekunden, zu beachten. Diese ist in der Zwischenzeitmatrix aufgelistet. Um die Zwischenzeit nicht zu verletzen, wird die Signalgruppe K7, welche in SiPI 17 eine Freigabezeit von 15 Sekunden hat, um eine Sekunde verkürzt. Das bedeutet, dass die Freigabezeit von K7 bei Sekunde 62 startet und in Sekunde 76 endet. Tabelle 8 zeigt die Auswertungen dieser Änderung.

Tabelle 8: 1.Szenario erste Verbesserung

Signalgruppe	Detektor	Gesamt-Zeitverlust in Sek.	Durchschnittlicher Zeitverlust pro Fahrzeug in Sek.
K1	D1	5344,67	12,91
K7	D10D11	14473,13	39,22
K8	D12	5002,29	40,02
K9	D13	11545,26	32,249
K10	D14D15	11201,51	31,55
K2	D2D3	23340,62	55,97
<b>K3</b>	<b>D4</b>	<b>77515,83</b>	<b>362,22</b>
K4	D5D6	11221,62	37,04
K5	D7	5052,37	44,32
K6	D8	1810,31	14,14
Gesamt SUMME		166507,61	669,65
Durchschnittlich		16650,76	66,97

Anhand der Simulation ist zu sehen, dass der IST-Wert in diesem Szenario auf durchschnittlich 5 Fahrzeuge pro Umlaufzeit gestiegen ist. Die Gesamtsimulationsdauer verlief insgesamt kürzer als zuvor und betrug 4422 Sekunden, diese Ergebnisse befinden sich im Anhang.

Die Änderung zeigte eine positive Wirkung, da der Fahrstreifen D4 nun einen durchschnittlichen timeLoss von 362,22 Sekunden hat (vorher 579,27 Sek.), was eine deutliche Reduzierung des timeLoss aufzeigt. Ebenfalls ist der gesamtdurchschnittliche Zeitverlust von anfangs 949,22 auf 669,65 Sekunden gesunken. Das entspricht einer Verbesserung von 29,45 % nach einer Iteration.

#### Zweite Iteration:

Da D4 immer noch einen hohen durchschnittlichen Zeitverlust zur Folge hat, soll in der Signalgruppe K3 noch zusätzlich eine weitere Freigabesekunde gewährt werden. K7 hingegen wiederum soll um eine Sekunde reduziert werden. Dadurch hat K3 insgesamt zwei Sekunden mehr Freigabezeit und K7 zwei Sekunden weniger Freigabezeit zum originalen Signalplan SiPI 17. Die Auswertung der zweiten Verbesserung ist in Tabelle 9 zu sehen.

Tabelle 9: 1.Szenario zweite Verbesserung

Signalgruppe	Detektor	Gesamt Zeitverlust in Sek.	Durchschnittlicher Zeitverlust pro Fahrzeug in Sek.
K1	D1	4891,12	11,81
K7	D10D11	14854,06	40,25
K8	D12	4921,75	39,37
K9	D13	11548,22	32,26
K10	D14D15	11284,33	31,79
K2	D2D3	14934,24	35,81
<b>K3</b>	<b>D4</b>	<b>36030,6</b>	<b>168,37</b>
K4	D5D6	11308,8	37,32
K5	D7	5073,18	44,50
K6	D8	1779,34	13,90
Gesamt SUMME		116625,64	455,39
Durchschnittlich		11662,56	45,54

Die Simulationsdauer verlief kürzer als in den beiden oberen Verbesserungen und betrug insgesamt 3971 Sekunden. D4 zeigt nur noch einen durchschnittlichen Zeitverlust von 168,37 Sekunden auf. Die Summe zeigt eine deutliche Verbesserung, denn der gesamtdurchschnittliche Zeitverlust aller Detektoren beschreibt einen Wert von 455,39 Sekunden. Das ist im Vergleich zum originalen Signalplan SiPI 17 eine Verbesserung um 52,02 %.

#### Dritte Iteration:

Signalgruppe K3 erhielt wieder eine Sekunde mehr Freigabezeit und K7 verlor eine Sekunde Freigabezeit. Zum Ursprungsignalplan SiPI 17 hat K3 nun insgesamt 3 Sekunden mehr Freigabe und Signalgruppe K7 3 Sekunden mehr Sperrzeit. Die Auswertung ist in Tabelle 10 zu sehen.

Tabelle 10: 1.Szenario dritte Verbesserung

Signalgruppe	Detektor	Gesamt-Zeitverlust in Sek.	Durchschnittlicher Zeitverlust pro Fahrzeug in Sek.
K1	D1	4850,59	11,72
K7	D10D11	15371,82	41,66
K8	D12	4915,08	39,32
K9	D13	11566,73	32,31
K10	D14D15	11194,09	31,53
K2	D2D3	14724,21	35,31
K3	D4	9203,45	43,01
K4	D5D6	11248,21	37,12
K5	D7	5057,84	44,37
K6	D8	1869,67	14,61
Gesamt SUMME		90001,69	330,95
Durchschnittlich		9000,17	33,10

Mit dem SiPI 17 betrug die Simulationsdauer in SUMO anfangs 4788 Sekunden. Durch die Umverteilung der Freigabesekunden in den Signalgruppen stellte sich eine deutliche Verbesserung heraus. Die dritte Iteration wies eine Simulationsdauer von 3700 Sekunden durch die Software SUMO auf. Hierbei wird an die tatsächliche Zeit angenähert trotz veränderter Ampelphasen. In der Simulation verlief der Verkehr flüssig und ausgewogen.

Die Änderung des Lichtsignalplans SiPI 17 ließ die Werte der Signalgruppen alle unter 50 Sekunden fallen. Durch die Umverteilung des SiPI 17 ist die Zeitverlustsumme aller Detektoren von insgesamt 330,95 Sekunden entstanden. Das ist eine Verbesserung von 65,13 % zum Ausgangssignalplan SiPI 17.

#### 6.4.3 Verbesserung 2.Szenario

Auch in Szenario 2 ist aufgefallen, dass der Ablauf der Simulation 4049 Sekunden benötigt, das liegt über dem SOLL-Wert von 3600 Sekunden. Anhand der Methodik wurde erst einmal der SOLL-Wert jedes einzelnen Detektors ausgerechnet, das bedeutet, wie viele Fahrzeuge über den jeweiligen Detektor innerhalb einer Umlaufzeit fahren müssen. Dabei hat sich herausgestellt, dass in D1 der SOLL-Wert auf 17,13 Fahrzeuge in einer Umlaufzeit betragen soll. In der Simulation wurden dann die Fahrzeuge jeder Fahrspur innerhalb einer Umlaufzeit gezählt.

Dieser beschreibt den IST-Wert. Durch das Zählen der Fahrzeuge konnte in manchen Fahrspuren ein ausgewogener, ein unterforderter und ebenfalls ein überforderter Zustand betrachtet werden. Die unterforderten IST-Werte mit hohem timeLoss wurden dann analysiert und die Zeiten ihrer Signalgruppe dadurch umverteilt.

In Szenario 2 ist in der Simulation aufgefallen, dass sich die Fahrzeuge in den Detektoren D10D11 sowie D12 sich aufgrund der geringen Freigabezeit stauen. In der Auswertung wiesen diese auch die höchsten Zeitverluste auf.

#### Erste Iteration des zweiten Szenarios:

In Szenario 2 wurden die Freigabezeit der Signalgruppe K7 um 1 Sekunde verlängert, da diese mit Signalgruppe K3 in der gleichen Phase sind, hat sich diese auch um eine Sekunde verlängert. Die Signalgruppe K4 wurde dabei um eine Freigabezeit-Sekunde verringert. Die Simulationsdauer lief durch die Umverteilung der Freigabezeiten kürzer und betrug 4047 Sekunden. Insgesamt wurde die Summe der Verlustzeiten aller Detektoren auf 613,75 Sekunden ausgewertet. Das ist eine Gesamtverbesserung von 89,25 Sekunden des vorherigen Zustandes. Dabei hat sich der timeLoss der Signalgruppe K7 deutlich verbessert auf einen durchschnittlichen timeLoss pro Fahrzeug von 73,72 Sekunden. Dafür haben andere Signalgruppen eine minimale Steigung ihrer Zeitverluste bekommen. Diese können in Tabelle 11 eingesehen werden.

Tabelle 11: 2.Szenario erste Verbesserung

Signalgruppe	DETEKTOR	Gesamt-Zeitverlust in Sek.	Durchschnittlicher Zeitverlust pro Fahrzeug in Sek.
K1	D1	10122,92	14,78
K7	D10D11	40913,63	73,72
<b>K8</b>	<b>D12</b>	<b>45879,11</b>	<b>192,77</b>
K9	D13	15360,31	42,20
K10	D14D15	11821,3	37,29
K2	D2D3	24374,59	39,83
K3	D4	22411,66	77,82
K4	D5D6	18856,65	42,00
K5	D7	8106,79	63,83
K6	D8	6081,23	29,52
Gesamt SUMME		203928,19	613,75
Durchschnittlich		20392,81	61,38

Nach der ersten Verbesserung hat K8 den größten durchschnittlichen Zeitverlust mit 192,77 Sekunden pro Fahrzeug. Das ist eine Verbesserung von 12,70% zum Ursprung.

### 2. Iteration

Bei der 2. Iteration wurde K10, welcher den niedrigsten Zeitverlust in der Auswertung ausmacht, um eine Sekunde reduziert. Um den timeLoss der Signalgruppe K8 zu senken, wurde in dieser Gruppe die Freigabezeit um eine Sekunde erhöht.

Tabelle 12: 2.Szenario zweite Verbesserung

Signalgruppe	DETEKTOR	Gesamt-Zeitverlust in Sek.	Durchschnittlicher Zeitverlust pro Fahrzeug in Sek.
K1	D1	10123,76	14,78
K7	D10D11	41272,86	74,37
K8	D12	21885,9	91,96
<b>K9</b>	<b>D13</b>	<b>38229,79</b>	<b>105,03</b>
K10	D14D15	14125,86	44,56
K2	D2D3	24327,22	39,75
K3	D4	12116,83	42,07
K4	D5D6	18147,89	40,42
K5	D7	7644,48	60,19
K6	D8	5797,26	28,14
Gesamt SUMME		193671,85	541,27
Durchschnittlich		19367,19	54,13

Die Auswertung hat ergeben, dass die sich die Gesamtsumme auf 541,27 Sekunden reduziert hatte. In dieser Schaltung fällt auf, dass die Signalgruppe K9 den höchsten Zeitverlust mit 105,03 Sekunden aufweist. In dieser Verbesserung wurde der Prozentsatz von 23% zum Anfangsplan SiPI 18 erreicht.

### 3. Iteration:

In der dritten und letzten Verbesserung wurde der durchschnittliche Zeitverlust des 2. Szenarios der Signalgruppe K9 reduziert.

Tabelle 13: 2.Szenario dritte Verbesserung

Signalgruppe	DETEKTOR	Gesamt-Zeitverlust in Sek.	Durchschnittlicher Zeitverlust pro Fahrzeug in Sek.
K1	D1	10017,87	14,62
K7	D10D11	38663,1	69,66
K8	D12	11490,98	48,28
<b>K9</b>	<b>D13</b>	<b>35567,31</b>	<b>97,71</b>
K10	D14D15	14219,12	44,86
K2	D2D3	25456,04	41,59
K3	D4	11379,76	39,51
K4	D5D6	18176,1	40,48
K5	D7	8176,98	64,39
K6	D8	4860,31	23,59
Gesamt SUMME		178007,57	484,71
Durchschnittlich		17800,76	48,47

Über Signalgruppe K2 und K9 wurde ein Freigabenabzug um jeweils eine halbe Sekunde durchgeführt. In Signalgruppe K7 wurde eine Sekunde Freigabezeit hinzugefügt. Die Simulation belief sich auf 3761 Sekunden in Verbesserung 3. Das ist nah am SOLL-Wert der Simulationsdauer von 3600 Sekunden. Die Verbesserung zeigt prozentual eine Verbesserung der Gesamtdauer von 31,05% des Ausgangswertes.

Zur besseren Übersicht wurde in dem Diagramm aus Abbildung 28 ein Vergleich der Auswertungsergebnisse aufgestellt.

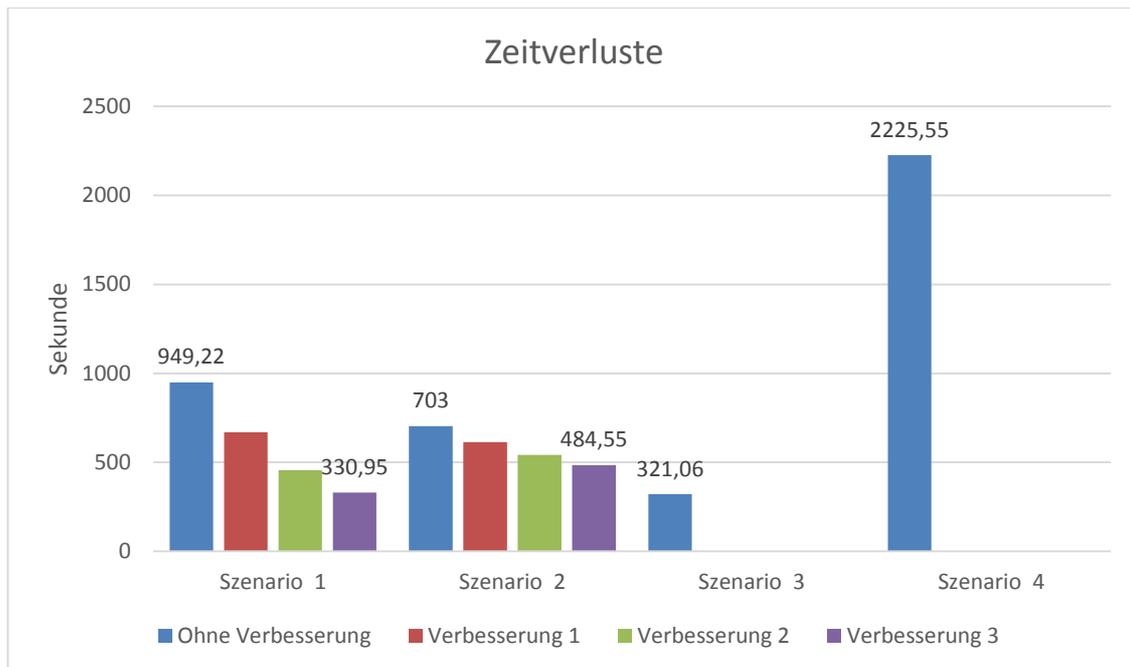


Abbildung 28: Alle Szenarien

Vergleich:

Durch die Verbesserung innerhalb der Simulationssoftware SUMO wurden im Szenario 1 und im Szenario 2 Verbesserungen des Verkehrs erreicht. Durch die Umverteilung der Freigabezeiten wurde in Szenario 1 eine Verbesserung von 65,13 % erreicht. Weiter kann Szenario 2 um einen Prozentsatz in Höhe von 31,05 % anhand von SUMO verbessert werden. Diese Umverteilungen müssten im Feldexperiment angewendet werden, um einzusehen, ob es wie in der Simulation zu einer Verbesserung kommt. Aus den Ergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass die Verbesserung im 1. Szenario die größte Wirkung aufwies. Ursprünglich hatte dieses Szenario einen sehr hohen timeLoss von 945 Sekunden. Durch die Umverteilung der Zeiten im SiPI 17 könnte der timeLoss auf 330,95 Sekunden reduziert werden.

In Szenario 3 und 4 wurden keine Lichtsignalanlagen eingesetzt. Daher konnten keine Verbesserungen über die Umverteilung von Freigabezeiten erzielt werden. Aufgrund des hohen timeLoss in Szenario 4 wird von einem 2-Spurigen Kreisverkehr ohne Lichtsignalanlagen abgeraten.

## 7 Fazit und Ausblick

Die Forschungsfrage, ob die Verkehrslage am Robert-Daum-Platz anhand der Simulationssoftware SUMO verbessert werden kann, wird mit ja beantwortet. Durch die Anwendung der Simulationssoftware SUMO konnte der Robert-Daum-Platz mit Realdaten der originalen Kreuzung vom Jahre 2018 nachgestellt werden. Konstruiert wurde die Simulation anhand von den Realdaten der Stadt Wuppertal. Um das Problem anzugehen, wurde eine Umlaufzeit von 90 Sekunden mit gegebenen Ampelphasen in SUMO konstruiert. Zur besseren Visualisierung wurden die Fahrzeuge von Detektoren aus demselben Ausgangspunkt farblich einheitlich dargestellt. Weiter wurden Detektoren mit einer spezifisch bestimmten Anzahl von Fahrzeugen hinzugefügt. Die erste Simulation wurde ohne Änderung der Stammdaten durchgeführt, um einen ersten Einblick zu erhalten. Dabei konnte erkannt werden, dass der timeLoss bei einigen Detektoren signifikant höher war als bei anderen. Das war bei der ersten Auswertung zu erkennen. Diese in der Auswertung erhaltenen Daten wurden für jedes einzelne Fahrzeug mit verschiedenen Kenndaten, wie timeLoss, duration und arrival, aufgezeigt. Die einzelnen Fahrzeuge konnten für jeden einzelnen Detektor als Gruppe aufgeteilt werden. Diese Daten wurden bewertet. Dabei wurden zwei Schlüsseldaten herausgefiltert. Dazu zählt der Gesamt- timeLoss und der durchschnittliche timeLoss pro Fahrzeug. Anhand des durchschnittlichen timeLoss pro Fahrzeug konnte ermittelt werden, welche Detektoren einen deutlich höheren timeLoss besaßen. Der gesamte timeLoss zeigte die Wichtigkeit und die Höhe der Auslastung des Detektors an. Um das System zu verbessern, wurde zuerst die optimal durchschnittliche Anzahl der Fahrzeuge für jeden Detektor in Bezug auf ein 90 Sekunden Umlauf ermittelt. Diese Fahrzeuge sollen innerhalb der Ampelphase durchgelaufen sein. Weiter wurde die Anzahl der Fahrzeuge pro Detektor und der zugehörigen Ampelphase festgestellt. Dabei wurde eine Diskrepanz in Szenario 1 bei D4 und D2D3, in Szenario 2 bei D10D11 und D12 entdeckt. Die Differenz des SOLL-Fahrzeug zur IST-Anzahl betrug bis zu 2 Fahrzeuge für die Umlaufzeit. Somit war der SOLL-Wert deutlich höher als der IST-Wert.

Um einen alternativen Verbesserungsansatz zu erforschen, wurde ein Kreisverkehr in die Simulation integriert. Der Kreisverkehr erbrachte nicht die gewünschten Ergebnisse. Der SOLL- und IST-Wert unterschied sich um einen hohen Faktor und würde zu einer erheblichen Einschränkung des Verkehrs führen.

Daraufhin wurde ein zweiter Ansatz angewandt, dieser war die Anpassung des Signalplans anhand der Anzahl der Fahrzeuge. Hierbei wurden die Detektoren ermittelt, die einen höheren IST-Wert als SOLL-Wert besaßen. Weiterhin wurde betrachtet, dass ein Fahrzeug bis zu eine Sekunde benötigt, um über die Ampel zu fahren, dadurch konnte erkannt werden, dass einige Ampelphasen zu reduzieren sind. Diese gewonnene Zeit wurde auf Detektoren aufgeschlagen, die einen höheren timeLoss besaßen. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass eine deutliche und relevante Verbesserung des timeLoss für SUMO erzielt werden konnte. Anhand von SUMO konnte eine Differenz bis zu 65,13 % des timeLoss erzielt werden. Dabei muss erwähnt werden, dass die Betrachtungszeit von 3600 Sekunden unter Anwendung in SUMO eine deutlich höhere Gesamtzeit benötigte, als in Echtzeit gemessen wurde. Die Ursache konnte in der Thesis nicht ermittelt werden. Durch die Umstellung des Ampelsystems konnte eine realistische Zeit auf SUMO erzielt werden. Das zeigt von der Qualität der Änderung der Ampelphasen, die von 0,5 bis 3 Sekunden des Realitätswertes abweichen. Trotzdem kann nicht eindeutig bestimmt werden, ob dadurch eine Verbesserung für die Verkehrskreuzung Robert-Daum- Platz ermöglicht werden kann, da Fußgänger durch diese Änderung eine längere Wartezeit an der Fußgänger Ampel verbringen müssen aufgrund der geregelten Zwischenzeiten. Diese Fragestellung muss weiter erforscht werden, da dies zu Unklarheiten führt. Die Empfehlung dieser Thesis lautet, dass eine mögliche Verbesserung erreicht werden könnte, wenn die Unterführung von 2008 wieder eingeführt werden würde. Dadurch wird ermöglicht, dass Ampelzeiten nochmal neu betrachtet werden können, ohne Fußgänger mit zu betrachten. Als Alternative könnte eine verkehrsabhängige Lichtsignalanlage in Betracht gezogen werden, die sich an dem aktuellen Verkehrsaufkommen orientiert. Dadurch passen sich die Freigabe und Sperrzeiten dem Bedarf an. Ferner könnten zur Verbesserung des Verkehrsflusses Ampelanlagen mit einem Countdown eingeführt werden. Weiterhin kann, um die Verkehrslage zu stabilisieren, eine Umweltstraße in Betracht gezogen werden, auf denen neben Bussen und Radfahrern auch Elektrofahrzeuge fahren dürfen.

## 8 Literaturverzeichnis

**§ 29 StrG. 2021.** *Straßengesetz - Kreuzungen und Einmündungen öffentlicher Straßen.* Baden-Württemberg : Straßenrecht, 2021.

**ADAC. 2021.** ADAC. [Online] 2021. [Zitat vom: 12. Januar 2022.]  
<https://assets.adac.de/image/upload/v1629205855/ADAC-eV/KOR/Text/PDF/countdownampel.pdf>.

— **2021.** ADAC. [Online] 2021. [Zitat vom: Dezember. 25 2021.]  
<https://www.adac.de/verkehr/recht/verkehrszeichen/>.

— **2021.** ADAC. [Online] 2021.  
[https://assets.adac.de/image/upload/v1583241960/ADAC-eV/KOR/Text/PDF/adac-umfrage-flaechenkonkurrenzen-im-verkehr-zielkonflikte-aus-sicht-der-verkersteilnehmer\\_fzqajl.pdf](https://assets.adac.de/image/upload/v1583241960/ADAC-eV/KOR/Text/PDF/adac-umfrage-flaechenkonkurrenzen-im-verkehr-zielkonflikte-aus-sicht-der-verkersteilnehmer_fzqajl.pdf).

— **2019.** ADAC. *ADAC.* [Online] ADAC, 24. Mai 2019. [Zitat vom: 17. Januar 2022.] <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/vorteile-elektroauto-stadt/>.

— **2002.** ADAC.e.V. *ADAC.* [Online] ADAC, 2002. [Zitat vom: 22. Dezember 2021.] <https://www.adac.de/verkehr/recht/verkehrsvorschriften-deutschland/kreisverkehr/>.

**Asphalt. 2022.** Asphalt.de. [Online] 2022.  
[https://www.asphalt.de/fileadmin/user\\_upload/asphaltberatung/praxisbeispiele/knotenpunktformen.pdf](https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/asphaltberatung/praxisbeispiele/knotenpunktformen.pdf).

**Astra, Bundesamt für Straßen. 2021.** ASTRA. [Online] Bundesamt für Strassen (ASTRA), 14. 6 2021. [Zitat vom: 2. Januar 2022.]  
<https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/verkehrsfluss-stauaufkommen/definitionen.html>.

**Banks, Jerry. 1998.** *Handbook of Simulation: principles, methodology, advances, applications and practice.* Bde. 0-471-13403-1. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1998. ISBN: 9780471134039.

**Barceló, Jaume. 2010.** *Fundamentals of traffic simulation.* New York : Springer, 2010. ISBN: 978-1-4419-6142-6.

**Bay. Staatsministerium, für Wohnen, Bau und Verkehr.** [stmb.bayern.de](https://www.stmb.bayern.de).  
*stmb.bayern.de*. [Online] Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und  
Verkehr. [Zitat vom: 27. 12 2021.]  
<https://www.stmb.bayern.de/vum/strasse/planung/regelwerke/index.php>.

**Brilon, W. , Regler, M., Geistefeldt, J. 2005.** *Zufallscharakter der Kapazität  
von Autobahnen und praktische Konsequenzen*. Bochum : Lehrstuhl für  
Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, 2005. Heft 3 (Teil 1) und Heft 4 (Teil  
2) 2005.

**Burmeister, Robert. 2022.** [Wuppertal.de](https://www.wuppertal.de/vv/produkte/104/104.31_Lichtsignalanlagen__Gruene_Welle.php). [Online] 2022. [Zitat vom: 02. 01  
2022.]  
[https://www.wuppertal.de/vv/produkte/104/104.31\\_Lichtsignalanlagen\\_\\_Gruene\\_  
Welle.php](https://www.wuppertal.de/vv/produkte/104/104.31_Lichtsignalanlagen__Gruene_Welle.php).

**BÜTLER, R., REDING, U. und DIERINGER, P. & FERELLA FALDA, M. 2010.**  
*Funktionale Anforderungen an Verkehrssysteme im Zusammenhang mit  
Lichtsignalanlagen*. Schweiz : s. l.: Schweizerischer Verband der Straßen und  
Verkehrsfachleute, 2010.

**Central. 2021.** CENTRAL Bestellung. [Online] 2021. [Zitat vom: 28. Dezember  
2021.] [https://www.centralbestellung.de/media/image/31/b6/18/traffic-light-  
876056\\_1280-1024x541.jpg](https://www.centralbestellung.de/media/image/31/b6/18/traffic-light-876056_1280-1024x541.jpg).

**Dallmeyer, Jörg. 2014.** *Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt*.  
Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN: 978-3-658-05207-2.

**Eclipse. 2022.** Eclipse. *Eclipse*. [Online] 2022.  
<https://www.eclipse.org/sumo/about/>.

**Eclipse Foundation Inc.** Eclipse. *Eclipse*. [Online] Eclipse Foundation Inc.  
[Zitat vom: 12. 01 2022.] <https://www.eclipse.org/sumo/>.

—. 2022. [sumo.dlr.de](https://sumo.dlr.de). *sumo.dlr.de*. [Online] Eclipse Foundation Inc., 31. 01  
2022. [Zitat vom: 06. 02 2022.] <https://sumo.dlr.de/docs/Netedit/index.html>.

—. 2022. [sumo.dlr.de](https://sumo.dlr.de). *sumo.dlr.de*. [Online] Eclipse Foundation Inc., 2022.  
[Zitat vom: 12. 01 2022.] <https://sumo.dlr.de/docs/Tutorials/OSMWebWizard.html>.

—, 2021. sumo.dlr.de. *sumo.dlr.de*. [Online] Eclipse Foundation Inc., 15. 04 2021. [Zitat vom: 08. 12 2021.]

<https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Output/TripInfo.html>.

**Engelmann, Dieter. 2020.** planet-wissen. *planet-wissen*. [Online] 24. März 2020. [Zitat vom: 22. Dezember 2021.] <https://www.planet-wissen.de/natur/umwelt/artensterben/pwiezersiedelungderlandschaft100.html>.

**Fellendorf, M. 2009.** Straßenverkehrstechnik und Telematik. TU Graz . Graz : Skriptum zur Vorlesung, 2009.

**FGSV. 2005.** *Hinweise zum Fundamentaldiagramm – Grundlagen und Anwendungen*. Köln : FGSV, 2005. ISBN: 3-937356-64-9.

—, 2004. *Merkblatt - Das Fundamentaldiagramm - Grundlagen und Anwendungen*. Berlin : Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2004.

—, 2008. *Richtlinien für integrierte Netzgestaltung RIN*. Köln : FGSV , 2008. ISBN: 978-939715-79-5.

**FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe "Straßenentwurf". 2006.** *Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren*. Köln : FGSV, 2006. ISBN: 3-937356-83-5.

**FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe "Straßenentwurf". 2006.** *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RASt*. Köln : FGSV, 2006. ISBN: 978-3-939715-21-4.

**FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe "Verkehrsmanagement". 2015.** *Richtlinien für Lichtsignalanlagen - Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr - RiLSA*. Köln : FGSV, 2015. ISBN: 978-3-939715-91-7.

**Füsser, Klaus. 1997.** *Stadt, Straße und Verkehr: ein Einstieg in die Verkehrsplanung* . Braunschweig : Vieweg, 1997. ISBN: 3-528-08141-4 Gb..

**Gerlough, Daniel L. und Huber, Matthew J. 1975.** *Traffic flow theory*. Washington, DC : Transportation Research Board National Research Council, 1975. ISBN: 0-309-02459-5.

**Gertz, Carsten. 2021.** *Verkehrsplanung, Bau und Betrieb von Verkehrsanlagen 3. Auflage.* Hamburg : Springer Vieweg, 2021. ISBN: 978-3-658-29500-4.

**Goodwin, Phil. 2003.** *The Economic Cost of Congestion when Road Capacity is Constrained.* 16th International Symposium on Theory and Practice in Transport Economics. London : s.n., 2003.

**Greenshields, Bruce D. 1935.** *A Study of Traffic Capacity.* In: Proceedings of the ... annual meeting,. 1935.

**Herbst, Markus. 2021.** STVO. [Online] 2021. [Zitat vom: 05. 01 2022.] [https://www.stvo2go.de/einmuendung-kreuzung/#Unterschied\\_zwischen\\_Kreuzung\\_und\\_Einmuendung](https://www.stvo2go.de/einmuendung-kreuzung/#Unterschied_zwischen_Kreuzung_und_Einmuendung).

— . 2021. stvo2go.de. *stvo2go.de.* [Online] stvo2go.de, 2021. [Zitat vom: 29. Dezember 2021.] <https://www.stvo2go.de/einmuendung-kreuzung/>.

— . 2021. stvo2go.de. *stvo2go.de.* [Online] stvo2go, 2021. [Zitat vom: 29. Dezember 2021.] <https://www.stvo2go.de/einmuendung-kreuzung/>.

**Höfler, Frank. 2006.** Verkehrswesen-Praxis, Band 2. *Verkehrstechnik.* Berlin : Bauwerk, 2006, S. 47.

**Krafftahrt-Bundesamt. 2021.** Krafftahrt-Bundesamt. [Online] 2021. [https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugbestand/2021/pm08\\_fz\\_bestand\\_pm\\_komplett.html?snn=3662144](https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugbestand/2021/pm08_fz_bestand_pm_komplett.html?snn=3662144).

**Krajzewicz, Daniel, Erdmann Jakob, Behrisch Michael, Bieker Laura. 2012.** Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban Mobility. *International Journal on Advances in Systems and Measurements.* 5, 2012, Bde. 3, 4, Berlin-Adlershof.

**Krimmling, Jürgen. 2017.** *Ampelsteuerung : Warum die grüne Welle nicht immer funktioniert.* Wiesbaden : Springer, 2017. ISBN: 978-3-658-17321-0.

**Lehnhoff, N. 2005.** *Überprüfung und Verbesserung der Qualität von automatisch erhobenen Daten an Lichtsignalanlagen.* Hannover : s.n., 2005. ISBN: 3-922344-34-8.

**Lopez, P.A., et al. 2018.** *Microscopic Traffic Simulation using SUMO.* Hawaii, USA : ITSC, 2018.

**Maier, Reinhold und Berger, Ralf. 2012.** *Schmale zweibahnig vierstreifige Landstraßen (RQ21)*. Bergisch Gladbach : Bundesanstalt für Straßenwesen, 2012.

**Murmaie, Dieter. 2021.** *Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln*. Verkehrswesen. Stuttgart : s.n., 2021.

**Radio91.2. 2021.** Radio 91.2. [Online] 27. 04 2021.  
<https://www.radio912.de/artikel/stickoxid-grenzwerte-in-dortmund-eingehalten-934063.html>.

**Rehder, Carsten. 2019.** Drei, zwei, eins – und grün! *Westdeutsche Zeitung*. 2019.

**Schaal, M. 2006.** *Verkehrsmodellierung*. Universität Stuttgart : s.n., 2006.

**Schnabel, Werner und Lohse, Dieter. 1997.** *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 1: Verkehrstechnik v. Werner Schnabel*. Berlin : Bauwesen, 1997. ISBN-13: 9783410164432.

**Semrau, Marc. 2018.** *Untersuchung zur Modellierung von chinesischem Fahrverhalten auf Autobahnen für den Test pilotierter Fahrfunktionen*. Wiesbaden : Springer, 2018. ISBN: 978-3-658-23761-5.

**Stegemann, G. und Ameling, W. 1982.** *Simulation und Bewertung von Verkehr in signalgesteuerten Stadtstraßennetzen*. Berlin, Heidelberg : Springer, 1982. ISBN: 978-3-540-11605-9.

**StVO. 2013.** § 4 Abstand. s.l. : Straßenverkehrs-Ordnung , 2013.

**SUMO. 2021.** Sumo. *Sumo*. [Online] SUMO, februar 2021.  
<https://sumo.dlr.de/docs/Tutorials/OSMWebWizard.html>.

**Systems, ITSC International Conference on Intelligent Transportation. 2018.** *Microscopic Traffic Simulation using SUMO*. Maui, Hawaii, USA : s.n., 2018.

**Treiber, Martin und Kesting, Arne. 2010.** *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010. ISBN: 978-3-642-05228-6.

**Uebrick. 2007.** *Robert-Daum-Platz - Schließung der Tunnel und Anlegung von Fußgängerüberwegen*. Wuppertal :  
[https://ris.wuppertal.de/vo0050.php?\\_\\_kvonr=8143](https://ris.wuppertal.de/vo0050.php?__kvonr=8143), 2007.

**Wolfgang. 2012.** archiv. [Online] 2012. [Zitat vom: 2022. Januar 17.]  
<https://archive.vn/20121205065117/http://www.wolfgang-mondorf.de/elberfeld.html#selection-659.1693-659.1694>.

**WU, N. 2000.** *Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm - Ein neues Modell und seine Anwendungen; Straßenverkehrstechnik.* Bonn : Kirschbaumverlag, 2000.

**Zweirad-Industrie-Verband. 2021.** [Online] 2021. [https://www.ziv-zweirad.de/uploads/media/PM\\_2021\\_10.03.\\_ZIV-Praesentation\\_10.03.2021\\_mit\\_Text.pdf](https://www.ziv-zweirad.de/uploads/media/PM_2021_10.03._ZIV-Praesentation_10.03.2021_mit_Text.pdf).

# 9 Anhang

<b>Unverträglichkeitsmatrix</b>	Stadt Wuppertal Straßenverkehrstechnik R104.31
---------------------------------	---

		EINFÄHREND																					
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	S1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	R1	R2	BL1	BL2	
RÄUMEND	K1	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	K2	-	■	-	X	X	-	-	X	X	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	
	K3	-	-	■	X	X	-	X	-	X	X	-	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-	
	K4	-	X	X	■	-	-	X	X	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	X	-	-	
	K5	-	X	X	-	■	-	X	X	X	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	
	K6	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	
	K7	-	-	X	X	X	-	■	-	X	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	
	K8	-	X	-	X	X	-	-	■	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	
	K9	-	X	X	-	X	-	X	X	■	-	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-	-	
	K10	-	X	X	X	X	-	X	X	-	■	-	-	-	X	-	-	-	X	-	-	-	
	S1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	F1	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	F2	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	X	-	-	
	F3	-	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-	
	F4	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	
	F5	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	
	F6	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	
	R1	-	-	-	X	-	-	-	X	X	X	-	-	X	-	-	-	-	-	■	-	-	
	R2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	
	BL1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	
	BL2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■

Knotenpunkt	Robert-Daum-Platz				
Variante	Herausnahme R2 und S1 - K7 als Vollscheibe				
Bearbeiter	BackhausK	Status	Bestand	Datum	01.12.2021
Abzeichnung	kb			Blatt	4.1

<b>Zwischenzeitenmatrix</b>	Stadt Wuppertal Straßenverkehrstechnik R104.31
-----------------------------	---

		EINFAHREND																					
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	S1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	R1	R2	BL1	BL2	
RÄUMEND	K1 ↖	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	K2 ↙	-	■	-	4	4	-	-	6	7	6	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	K3 ↘	-	-	■	4	5	-	5	-	4	4	-	-	4	-	-	8	-	-	-	-	-	-
	K4 ↗	-	8	6	■	-	-	4	7	-	4	-	-	-	-	5	-	-	7	-	-	-	-
	K5 ↖	-	9	5	-	■	-	5	9	10	9	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-
	K6 ↗	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-
	K7 ↘	-	-	5	8	6	-	■	-	4	4	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-
	K8 ↙	-	5	-	6	4	-	-	■	4	4	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-
	K9 ↘	-	4	7	-	6	-	10	5	■	-	-	-	-	-	-	10	-	4	-	-	-	-
	K10 ↖	-	5	9	10	6	-	11	5	-	■	-	-	-	12	-	-	-	4	-	-	-	-
	S1 ↗	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	F1 ↕	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	F2 ↘	-	12	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	12	-	-	-	-
	F3 ↙	-	-	-	-	-	-	11	-	-	9	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-	-
	F4 ↘	-	-	-	11	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-
	F5 ↗	-	-	5	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-
	F6 ↕	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-
	R1 ↖	-	-	-	4	-	-	-	7	11	10	-	-	4	-	-	-	-	■	-	-	-	-
	R2 ↗	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-
	BL1 ↖	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-
	BL2 ↗	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■
	min. Frei		6	10	8	8	8	6	8	8	8	8	-	6	6	6	6	6	6	6	-	-	-

In Betrieb

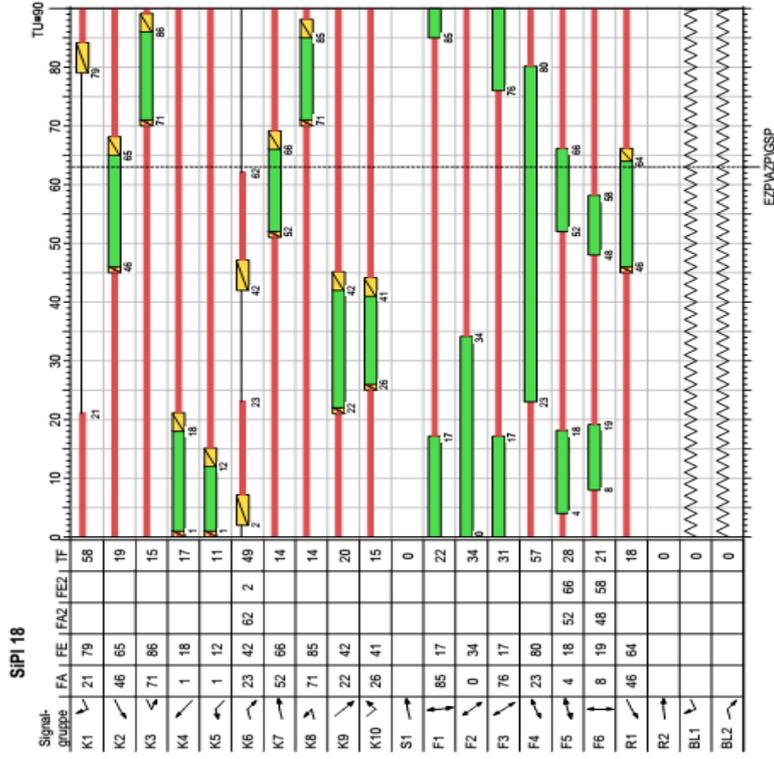
von:

bis:

Knotenpunkt	Robert-Daum-Platz				
Variante	Herausnahme R2 und S1 - K7 als Vollscheibe				
Bearbeiter	BackhausK	Status	Bestand	Datum	01.12.2021
Abzeichnung	kb / hd			Blatt	4.2



<b>SiPI 18</b>	Stadt Wuppertal Straßenverkehrstechnik R104.31
----------------	---



Inbetriebnahme:  
 von: 05.02.2018/bm  
 bis:

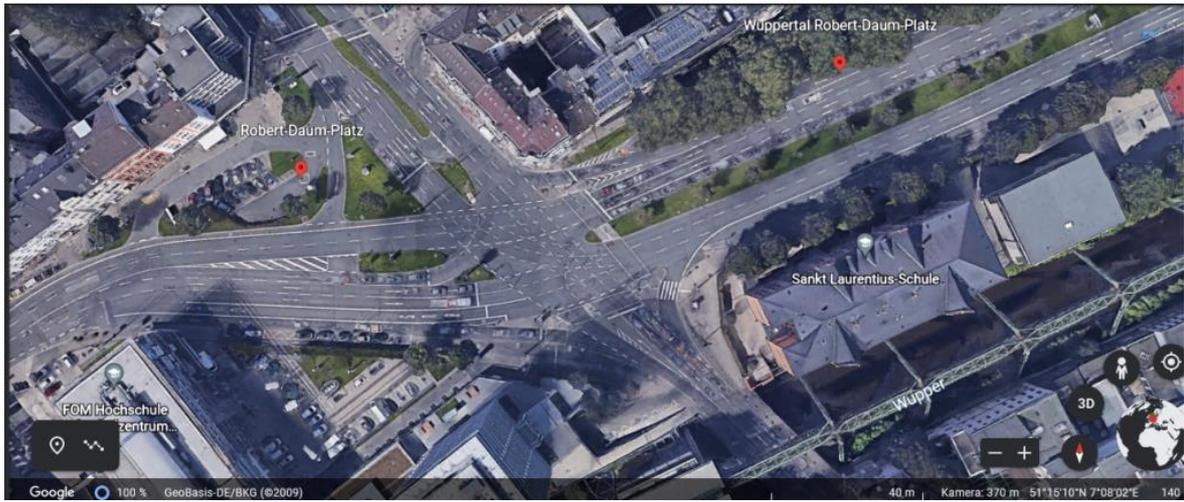
Projekt	223 - Robert-Daum-Platz		
Knotenpunkt	Koord.		
Auftragsnr.	Herausnahme R2 und S1 - K7 als Vollsch		Datum
Bearbeiter	Abzeichnung kb		Blatt
			01.08.2019
			7.18

## Verbesserung Szenario 1:

		Original SiPL 17	Original SiPL 17	1. Iteration	2. Iteration	3. Iteration
Signalgruppe	Detektor	SOLL-Wert	IST-WERT	IST-Wert	IST-Wert	IST-Wert
K1	D1	10,35	10	10	10	10
K2	D2D3	10,43	10	11	11	11
K3	D4	5,35	4	5	5	5
K4	D5D6	7,58	7	7	7	7
K5	D7	2,85	3	3	3	3
K6	D8	3,2	3	3	3	3
K7	D10D11	9,23	9	9	9	9
K8	D12	3,13	4	3	3	3
K9	D13	8,95	9	9	9	9
K10	D14D15	8,88	9	9	9	9
Simulationsdauer		3600 s	4788 s	4422 s	3971 s	3700 s

## Verbesserung Szenario 2

			Original SiPL 18	1. Iteration	2. Iteration	3. Iteration
Signalgruppe	Detektor	SOLL-Wert	IST-WERT	IST-Wert	IST-Wert	IST-Wert
K1	D1	17,13	17	17	18	18
K2	D2D3	15,3	15	15	16	15
K3	D4	7,2	7	7	7	7
K4	D5D6	11,23	12	12	12	12
K5	D7	3,18	4	3	3 - 4	3-4
K6	D8	5,15	1 und 5	1 und 5	1 und 4	1 und 4
K7	D10D11	13,88	12	14	14	14
K8	D12	5,95	4	6	6	5
K9	D13	9,1	9	10	9	9
K10	D14D15	7,93	8	8	7	8
Simulationsdauer		3600 s	4049 s	4047 s	3817 s	3761 s



## **10 Übersicht: Digitaler Anhang**

01 Quellcodes

---

02 Ergebnisse

---

03 Datensatz Stadt Wuppertal

---