



MS 8201 – Ein Konzept zur kooperativen  
Selbstorganisation von automatisierten  
Fahrzeugen in urbanen Gegenden

# Dokumenteigenschaften

Titel MS 8201 – Ein Konzept zur kooperativen Selbstorganisation von automatisierten Fahrzeugen in urbanen Gegenden

Betreff TP 8000, AP 8200

Institut TS

Erstellt von Dorothee Ritter

Beteiligte

Geprüft von Sten Ruppe

Freigabe von Anika Lobig

Datum 03.07.2020

Version 1.0

Pfad [https://teamsites.dlr.de/ts/NGC-KoFiF/Freigegebene%20Dokumente/Berichte/Meileinsteinberichte/TP%208000/MSB\\_8201\\_20200703.pdf](https://teamsites.dlr.de/ts/NGC-KoFiF/Freigegebene%20Dokumente/Berichte/Meileinsteinberichte/TP%208000/MSB_8201_20200703.pdf)

# Inhaltsverzeichnis

1	Thema und Problemstellung	3
2	Bestehende Ansätze zur Selbstorganisation von AVF in urbanen Gegenden	4
2.1	Platooning	4
2.2	Virtual Traffic Lights	4
2.3	Bewertung der VTL-Technologie	5
3	Konzept zur kooperativen Selbstorganisation mit automatisierten und Verkehrsteilnehmern	7
3.1	Allgemeine Beschreibung und Regeln	7
3.1.1	Szenario	7
3.1.2	Qualitätsparameter	8
3.1.3	Regularien	8
3.2	Fokus auf das Linksabbiegen zweier Fahrzeuge	10
4	Nächste Schritte	11
	Abbildungsverzeichnis	12
	Literaturverzeichnis	12
	Abkürzungsverzeichnis	13

## 1 Thema und Problemstellung

Mit der informations- und kommunikationstechnischen Vernetzung von Fahrzeugen in Vehicular Ad Hoc NETWORKS (VANETs<sup>1</sup>) ergeben sich neue Möglichkeiten für die Verkehrssteuerung. Es besteht das Potential den Verkehr durch neue Methoden effizienter, umweltverträglicher und sicherer zu gestalten. Im Blickwinkel stehen in diesem Dokument selbstorganisierte Ansätze. Selbstorganisation ist ein Prozess bei welchem eine globale Ordnung aus lokalen Interaktionen zwischen Beteiligten aus einem vermeintlichem oder tatsächlichen Chaos. Der Begriff der Selbstorganisation ist aus verschiedenen Disziplinen bekannt. Populär sind Beispiele aus der Biologie von Insektenkolonien, Vögel- und Fischeschwärmen. In vielen weiteren Fachgebieten sind selbstorganisierte Prozesse immer wieder zu finden. Aus der Physik sei an dieser Stelle beispielsweise die Quanten-Kritikalität [1] genannt, in der Chemie existiert Selbstorganisation auf molekularer Ebene [2].

Im Vordergrund von selbstorganisierten Systemen stehen zwei Charakteristika. Zum einen sind sie dynamisch und bedürfen kontinuierlicher Interaktionen ihrer Teilnehmer auf unterster Ebene um ihre Struktur zu erzeugen und zu erhalten. Zum anderen bilden sich aus Ihnen meist emergente Eigenschaften hervor. Die Vorteile solcher Systeme liegen in Robustheit, Skalierbarkeit, Flexibilität und ihrer Anpassungsfähigkeit. Daher sind künstlich erzeugte selbstorganisierte Systeme im Bereich des Engineerings von großem Interesse geworden. Hier ergeben sich zusätzlich die Vorteile, dass Komponenten simpel gehalten werden können und vergleichsweise geringe Einführungskosten entstehen.

Mit dem Auftreten von VANETs ergab sich ein neues Forschungsfeld, bei welchem es sich aufgrund der Systembeschaffenheit eignet, selbstorganisierte Prinzipien zu implementieren und eine Emergenz in Punkto Effizienz, Sicherheit und Umweltverträglichkeit zu untersuchen.

An dieser Stelle kann der Broadcast einer Nachricht eines Fahrzeugs an umliegende Fahrzeuge mit dem Verhalten von Insekten bei Aussendung von Pheromonen zur Kommunikation mit ihren Artgenossen verglichen werden. Es bestehen bereits erforschte Methoden zur Selbstorganisation von Fahrzeugen, bei denen diese, analog der Reaktion von Insekten bei Erfühlen von Pheromonen, ihr Verhalten danach ausrichten, welche Nachrichten sie empfangen. Dabei konnten bereits eine beträchtliche Effizienzsteigerung emergente Eigenschaften des Verkehrs in Simulationen nachgewiesen werden. [3]

Vorwiegend wird die Vehicle-2-Vehicle (V2V) Kommunikation vorwiegend genutzt um die Verkehrssicherheit zu steigern. Im Folgenden liegt der Fokus darauf, den Durchsatz von Fahrzeugen im Straßennetz zu steigern und CO<sub>2</sub>-Emissionen dabei zu senken. Dies soll auf Basis einer Selbstorganisation an Kreuzungen geschehen.

Globale Optimierung von Lichtsignalen innerhalb eines Verkehrsnetzes ist ein NP-schweres Problem, d.h. eine optimale Lösung ist aufgrund von der hohen Komplexität der Berechnungen in nicht polynomialer Zeit nicht zu berechnen, demnach in einer Implementierung gänzlich unperformant. Gerade deswegen sind selbst organisierte Verfahren an dieser Stelle von großem Interesse, in denen das Optimierungsproblem dezentral gelöst wird und somit die Komplexität ungleich sinkt.

---

<sup>1</sup> Vehicular Ad Hoc Network / Fahrzeug Ad Hoc Netzwerk <https://de.wikipedia.org/wiki/Fahrzeug-Ad-hoc-Netz>

Ziel dieses APs ist es, ein gewähltes Verfahren zur Selbstorganisation in einer Simulationsumgebung zu implementieren und hiermit eine kooperative Kreuzungsdurchfahrt inklusive Linksabbiegen zu demonstrieren.

## 2 Bestehende Ansätze zur Selbstorganisation von AVF in urbanen Gegenden

### 2.1 Platooning

Ein bereits in der Automobilindustrie erforschtes selbstorganisiertes Prinzip ist Platooning [4]. Die V2V Kommunikation dient hier den Fahrzeugen innerhalb eines Platoons um ihre Distanz zum vorigen Fahrzeug zu halten. Mittels dieser Kommunikation werden relevante Informationen unter den Fahrzeugen sehr schnell ausgetauscht, so dass die Fahrzeuge mit einer sehr geringen Verzögerung auf Handlungen der vorfahrenden Fahrzeuge reagieren können.

Im urbanen Bereich liegen die Vorteile des Platoonings, anders als auf Autobahnen, nicht primär bei der Einsparung von Emissionen durch das Fahren im Windschatten des vorigen Fahrzeugs. Es konnte durch Modellierung und Simulation ermittelt werden, dass durch Fahren der Fahrzeuge im Platoon eine Steigerung des Verkehrsdurchsatzes um das Zwei- bis Dreifache erzielt werden kann [5].

### 2.2 Virtual Traffic Lights

Eine Technologie, mittels derer an urbanen Kreuzungen durch Selbstorganisation eine wesentliche Effizienzsteigerung erzielt werden kann, ist die der Virtual Traffic Lights (VTL) [3]. Hier ist keine Lichtsignalanlage oder sonstige Road-Side Unit notwendig. Die Kommunikation, mittels derer von ‚virtuellen‘ Lichtsignalen endet, unter den Fahrzeugen wird allein innerhalb des VANETs realisiert.

Die Technologie der Virtual Traffic Lights, die in Abbildung 1 veranschaulicht wird, beinhaltet drei Schritte: Zuerst werden alle Fahrzeuge mittels Clusteralgorithmen [6] innerhalb einer gewissen Distanz zur Kreuzung einem Cluster zugewiesen und bestimmen einen Intersection Leader. Im zweiten Schritt bestimmt der Intersection Leader nach einem Algorithmus die Reihenfolge, in welcher die Fahrzeuge durch die Kreuzung fahren und sendet die jeweiligen Ampelsignale (rot, gelb, grün) an die einzelnen Fahrzeuge. Die Ampelsignale werden dem Fahrer bspw. im Head Up Display angezeigt. Dieser Schritt ist nicht notwendigerweise an die VTL-Technologie geknüpft, sondern findet sich auch dort, wo eine RSU die Ampelphasen berechnet und als Signalgeber fungiert. Im dritten und letzten Schritt wird die Übergabe des Intersection Leads an ein anderes Fahrzeug durchgeführt, sobald der Intersection Leader den Kreuzungsbereich verlässt.

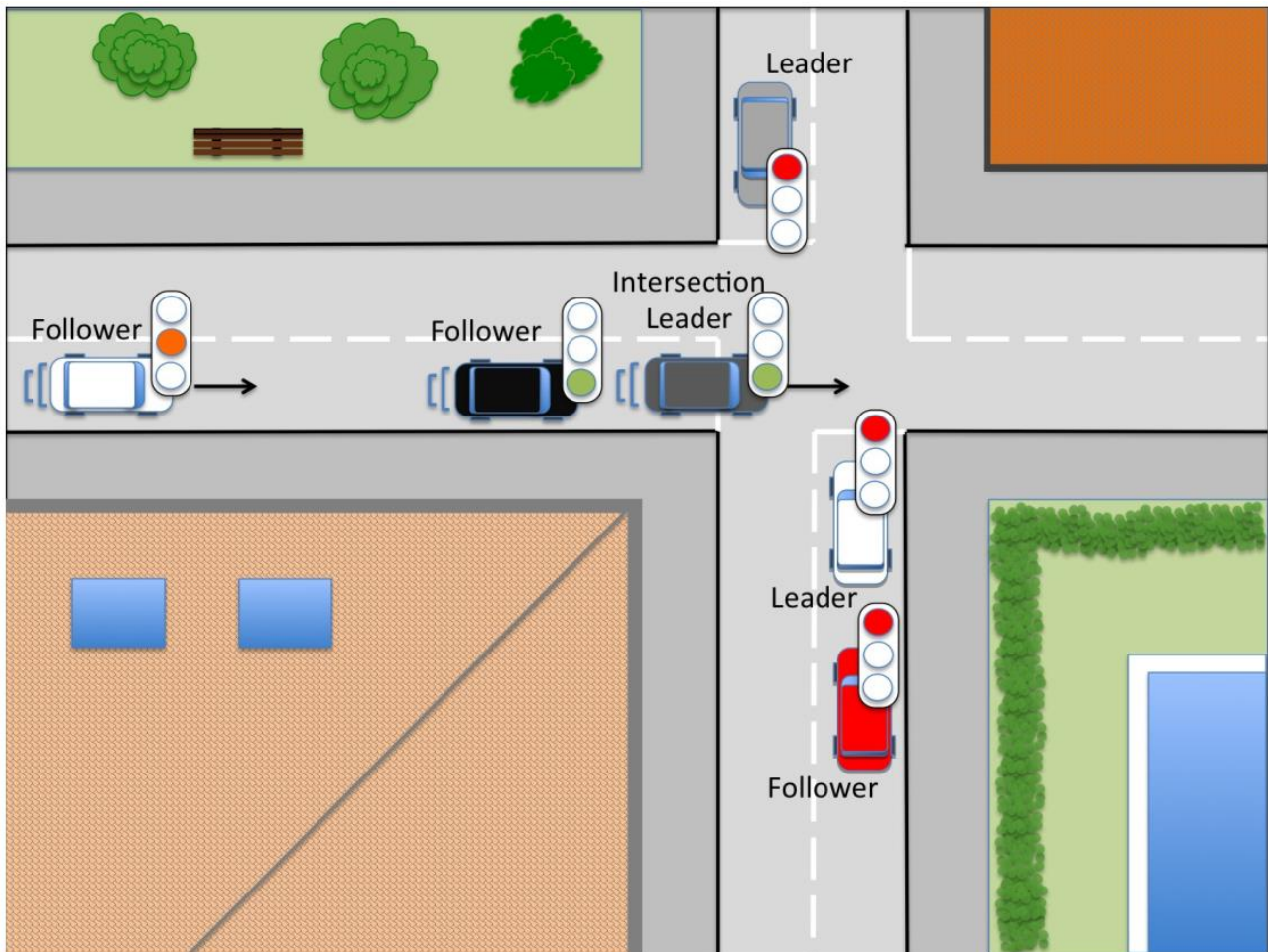


Abbildung 1: Visualisierung Virtual Traffic Lights [7]

### 2.3 Bewertung der VTL-Technologie

In der durchgeführten Literaturrecherche und der anschließenden Analyse wurden folgende Merkmale der Virtual Traffic Light Technologie identifiziert. Ein wesentlicher Vorteil ist die Effizienzsteigerung des Verkehrsfluss bei hoher Straßenauslastung (z.B. im Berufsverkehr) um bis zu 60%. Diese konnte in Simulationen nachgewiesen werden [3]. Daneben steht der zweite wesentliche Vorteil der Technologie. Die Kosten von Virtual Traffic Lights sind gering im Verhältnis zu den vergleichsweise hohen Einführungs- und Wartungskosten eines Kreuzungsmanagement mittels RSU[3].

Nachteilig ist, dass 100% aller Fahrzeuge mit der Technologie ausgestattet sein müssen. Es existieren kaum Ideen den bisherigen Verkehr mit dieser Technologie in einer Übergangsphase zu vereinen. Auch ist die Integration von Fußgängern nicht gelöst.

Für die Weiterentwicklung des VTL-Verfahrens zur Selbstorganisation an Kreuzungen wurden einige Ideen entwickelt: Zunächst betrachten wir mögliche Lösungsansätze der negativen Problematik der Virtual Traffic Lights. In [8] weisen die Autoren gewisse Straßenauszüge zur exklusiven Nutzung für Fahrzeuge mit VTL aus. Dies soll nebenbei weitere Verkehrsteilnehmer motivieren, ihre Fahrzeuge ebenfalls mit VTL Technologie

auszustatten. Weiter gibt es eine Idee, Virtual Traffic Lights mit einer Lichtsignalanlage zu kombinieren, mit welcher der Intersection Leader über V2I kommuniziert [9]. Hierdurch lässt sich das Problem der notwendigen 100% Verfügbarkeit von VTL in allen Fahrzeugen kompensieren. Dies soll hier allerdings nicht weiter betrachtet werden, da nach Organisationsprinzipien gesucht wird, welche ohne eine steuernde Instanz auskommen.

Bei Betrachtung des zweiten Schritts der VTL Technologie, in dem die Reihenfolge der Durchfahrt der einzelnen Fahrzeuge berechnet wird, wird offensichtlich, dass an dieser Stelle ein weiteres Forschungsfeld zu Tage tritt. Ist die Verkehrslage der Kreuzung dem Intersection Leader erst einmal bekannt, kann an dieser Stelle jeder Algorithmus zur Bestimmung der Reihenfolge implementiert werden. Es entsteht ein Optimierungsproblem, für welches in der Literatur unter dem Überbegriff Self Organized Traffic Signals und Decentralised Intersection Management vielfältige Ansätze gibt. Diese reichen von einfachen Algorithmen, welche derjenigen Fahrbahn grünes Licht geben, an der die meisten Fahrzeuge warten [10], über Verfahren, wie die verlustzeitbasierte Ampelschaltung, die aufgrund der Wartezeiten aller sich an einer Kreuzung befindlichen Fahrzeuge die Signalvergabe steuert [11], bis zu komplexen Algorithmen Optimierungsproblem an der Kreuzung in ein Traveling Salesman Problem übersetzen und mit Methoden der Ant Colony Optimization optimieren [12]. Bereits einfache Algorithmen verbessern den Verkehrsfluss beträchtlich, im Vergleich zu den Algorithmen zur Koordination des Lichtsignalanlage, die sich im aktuellen Straßenverkehr befinden (SCOOT, SCATS) [10]. Zusätzlich wurde auch die Vernetzung von wenigen aufeinander folgenden LSA untersucht, um an vielbefahrenen Ein- und Ausfallstraßen in Städten einen Rückstau auf Abschnitten zu vermeiden, in denen die Distanz zwischen zwei LSA gering ist. Für ein Straßennetz mit selbst-organisierten Lichtsignalanlagen ergab sich, dass sinnvollerweise 2-3 LSA miteinander zu koppeln sind [13].

### 3 Konzept zur kooperativen Selbstorganisation mit automatisierten und Verkehrsteilnehmern

Auf Basis der beschriebenen Ergebnisse aus dem Kapitel 2 wurde ein Konzept zur Selbstorganisation mit automatisierten und kooperativen Verkehrsteilnehmern erarbeitet. Der zugrunde liegende Systemansatz bedient sich der Virtual Traffic Lights. Im Folgenden wird zunächst das Szenario mit notwendigen Bedingungen beschrieben, es folgen Qualitätsparameter, die zwischen den Autos auszutauschen sind, und zuletzt die Regularien, unter denen dieses Konzept durchgeführt werden kann. Im Flowchart in Abbildung 2, der die Durchführung der virtuellen Signalvergabe an einer Kreuzung veranschaulicht.

#### 3.1 Allgemeine Beschreibung und Regeln

##### 3.1.1 Szenario

- Die Verkehrsteilnehmer fahren in einem urbanen Straßennetzwerk, in der mit Lichtsignalanlagen ausgestattet ist. Die maximale Geschwindigkeit der Fahrzeuge beträgt 50km/h, wie innerstädtisch vorgegeben.
- Alle Verkehrsteilnehmer sind mit V2V Technologie ausgestattet. Die zugehörigen Kommunikationsgeräte haben eine ausreichende Reichweite, sowie auch die Latenzzeit angemessen ist, um eine Reihenfolge für die Durchfahrt aller Fahrzeuge durch die Kreuzung zu bestimmen und in Form von virtuellen Lichtsignalen an die Fahrzeuge zu senden, so dass jedes Fahrzeug bereits vor Erreichen der Kreuzung ein Ampelsignal empfangen und bestätigt hat, und unnötige Abbremsseffekte vermieden werden können.
- Die V2V Technologie ist sicher und verlässlich
- Alle Fahrzeuge nutzen dieselbe digitale Straßenkarte. In dieser Straßenkarte sind Kreuzungen für die Fahrzeuge gekennzeichnet, so dass für die Fahrzeuge ersichtlich ist, wann mögliche Kollisionen mit anderen Fahrzeugen auftreten können
- Alle Fahrzeuge verfügen über ein DGPS-Gerät (Differential Global Positioning System), welches Zeit- und Positions-Synchronisierung aller beteiligten Fahrzeuge garantiert, mit Genauigkeit der Fahrbahn



### 3.1.2 Qualitätsparameter

- Position
- Geschwindigkeit
- Beschleunigung
- Fahrtrichtung
- Ggf. Fahrzeugmodell oder Typ (PKW, LKW, Einsatzfahrzeug, Bus, Taxi)
- Befindet das Fahrzeug beim Heranfahren an die Kreuzung in einem Platoon?  
Wenn ja, ist es Leader oder Follower? Wenn Leader, wie viele Fahrzeuge folgen?

### 3.1.3 Regularien

- Die Fahrzeuge kommen hintereinander geordnet mit einer Reihenfolge an die Kreuzung heran, d.h. es gibt keine nebeneinander fahrenden Fahrzeuge auf zwei Spuren, oder einen Fahrradfahrer auf einer Fahrradspur neben den Fahrzeugen.
- Innerhalb einer Spur bilden die Fahrzeuge eine Platoon, und senden ihre Parameter an den Platoon Leader
- Die Platoon Leader bilden ein Cluster und ermitteln einen Intersection Leader (IL)
- Der IL ermittelt mittels gewähltem implementierten Algorithmus
- Ein Fahrzeug fährt erst über die Kreuzung, nachdem es vom IL ein grünes virtuelles Ampelsignal erhalten hat. Nach Durchfahrt der Kreuzung bestätigt es diese an den IL
- Im ersten Schritt fährt nur ein Fahrzeug durch die Kreuzung, auch wenn paralleles Durchfahren theoretisch möglich ist

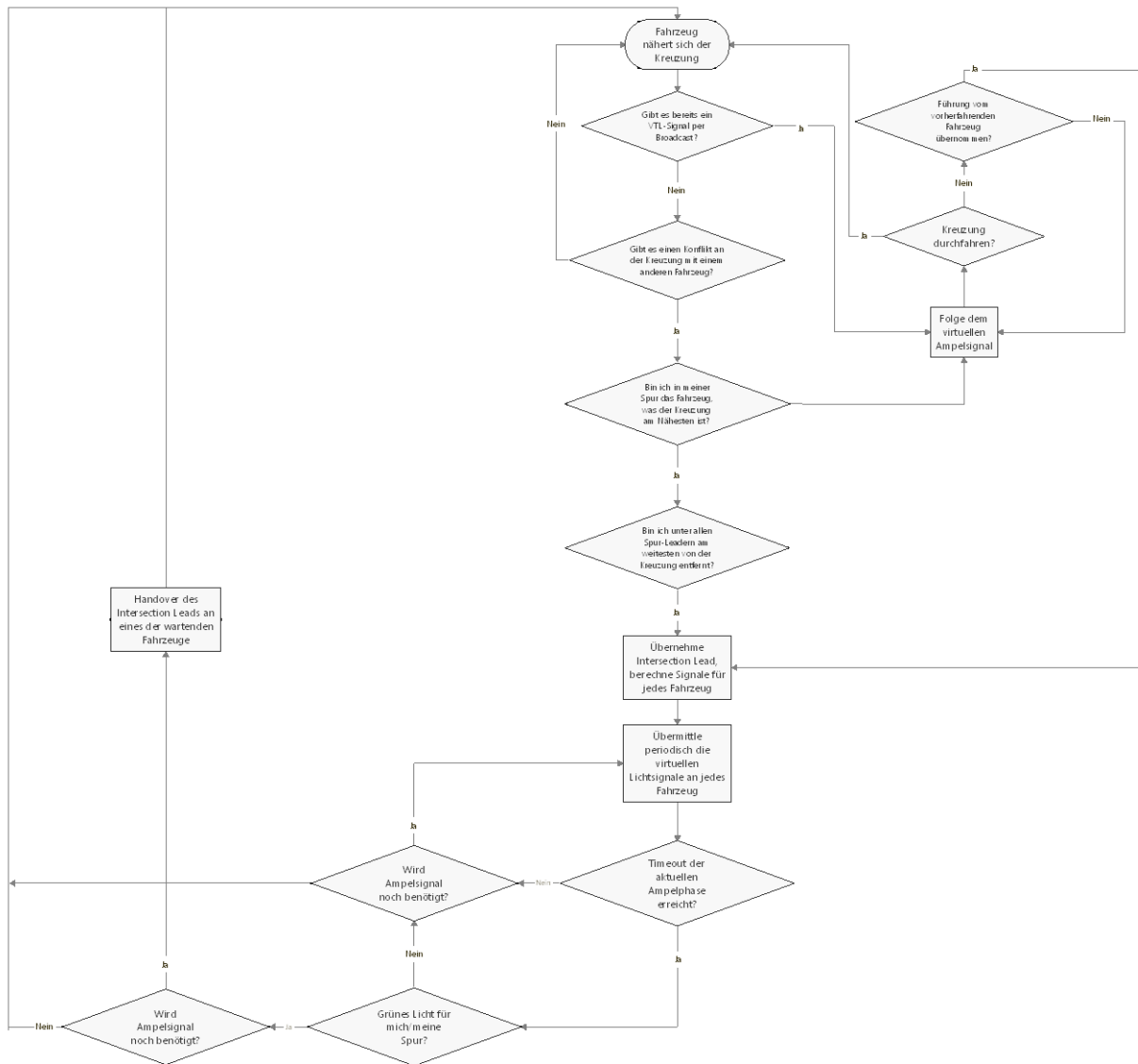


Abbildung 2: Visualisierung Virtual Traffic Light Algorithmus [14]

### 3.2 Fokus auf das Linksabbiegen zweier Fahrzeuge

Versuchsaufbau:

Zwei Fahrzeuge fahren auf einem Gelände mit Straßenkarte in einer Schleife, so dass sie sich immer wieder kreuzen und Linksabbiegersituationen entstehen. Ein Beispiel für den Versuchsaufbau könnte beispielsweise so aussehen:

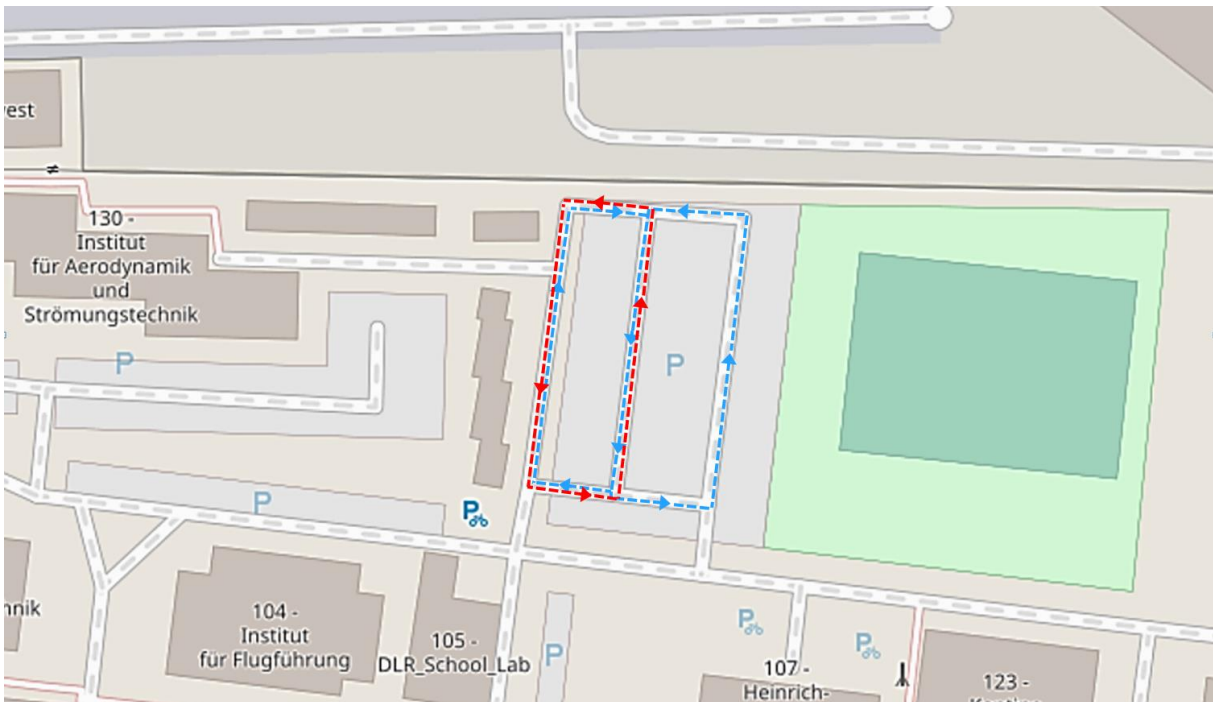


Abbildung 3: Versuchsaufbau Linksabbiegen zweier Fahrzeuge mit VTL

Es werden 2 Versuchsreihen durchgeführt, in dem das Fahrzeug mit dem blau gekennzeichneten Weg jeweils eine feste Anzahl von Durchläufen fährt.

- 1) Es gilt rechts vor links an Kreuzungen
- 2) Die Fahrzeuge ermitteln mit VTL die Vorfahrt

Im Anschluss werden verschiedene Zeiten gemessen, die Gesamtfahrzeit für n Schleifendurchläufe durch die Teststrecke, Durchfahrzeiten einzelner Kreuzungssituationen, Zeiten zur Ermittlung des Intersection Leaders und Zeiten zur Ermittlung der Reihenfolge.

Es ist leicht zu erkennen, dass sich die Komplexität des Versuchsaufbaus beliebig erhöhen lässt, in dem weitere Fahrzeuge auf der blauen und roten Strecke fahren. In diesen Fällen wird ein Vergleich der gemessenen Zeiten bei unterschiedlich hoher Verkehrsdichte besonders interessant, sowie zeitliche Abläufe von Staubildung und Stauauflösung in den beiden verschiedenen Varianten der Verkehrsregelung.

## 4 Nächste Schritte

Mit Fokus auf MST 8202 wird in den nächsten Schritten mittels Simulation eine Kreuzungsdurchfahrt auf Basis des Konzepts aus 3. realisiert und getestet. Dafür ist ein geeignetes Simulationsprogramm zu wählen, welches zum einen den Verkehr mit dem Straßennetz simuliert, als auch die Kommunikation der Fahrzeuge in einem VANET simuliert. Hier sind ggf. zwei Simulationsprogramme zu kombinieren, was einen gewissen zeitlichen Umsetzungsrahmen erfordert.

Nach erfolgreichen Tests wird ein Vergleich von Gesamtfahrzeiten bei n Schleifendurchläufen der Fahrzeuge durch die Teststrecke interessant. Verglichen wird konventionelle Verkehrsregelung (Rechts vor Links, Vorfahrtstraße) mit einer Verkehrsführung mit implementierter Virtual Traffic Light Technologie.

Aufschlussreich wird ein Vergleich der notwendigen Geschwindigkeit der Datenübertragung und der Latenzzeit, welche aus der Ablaufzeit des VTL-Algorithmus folgen, mit den Daten aus realen Testscenarien anderer Versuchsaufbauten. Erwartet wird, dass letztendlich Abstriche bei der Komplexität des Algorithmus gemacht werden müssen um die Technologie im Realverkehr einsetzen zu können. Auch kann im Anschluss eine Erhöhung der Komplexität durch Verwendung von mehr als 2 Fahrzeugen betrachtet werden, sowie daraus resultierende Gesamtfahrzeiten, Staubildungen, Stauauflösungen, sowie erkennbare optimale Verkehrsdichten für das Kreuzungsmanagement mittels Virtual Traffic Lights.

Zur Erreichung des MST 8203 werden ausgewählte Funktionen zur Selbstorganisation im Use Case 2 getestet und demonstriert. Hier wird sich während der Umsetzung des zunächst geplanten Versuchsaufbau zeigen, welche Funktionen sinnvollerweise zum Einsatz kommen.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Visualisierung Virtual Traffic Lights [7].....	5
Abbildung 2: Visualisierung Virtual Traffic Light Algorithmus [14].....	9
Abbildung 3: Versuchsaufbau Linksabbiegen zweier Fahrzeuge mit VTL .....	10

## Literaturverzeichnis

- [1] Ansari, Mohammad H, and Lee Smolinn. (2008). Self-Organized Criticality in Quantum Gravity. *Classical and Quantum Gravity*
- [2] G. Ungar, Y. Liu, X. Zeng, V. Percec, W.-D. Cho. (2003). Giant supramolecular liquid crystal lattice. *Science* 299, 1208–1211
- [3] Ferreira, Michel & Conceição, Hugo & Viriyasitavat, Wantanee & Tonguz, O.K. (2010). Self-organized traffic control. 85-90.
- [4] Schindler, Julian & Dariani, Reza & Rondinone, Michele & Walter, Thomas. (2019). Implementation and Testing of Dynamic and Flexible Platoons in Urban Areas in AAET, Braunschweig-Germany.
- [5] Lioris, Jennie & Pedarsani, Ramtin & Yildiz, Fatma & Varaiya, Pravin. (2015). Platoons of connected vehicles can double throughput in urban roads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.
- [6] C. Cooper, D. Franklin, M. Ros, F. Safaei and M. Abolhasan. (2017). A Comparative Survey of VANET Clustering Techniques. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 657-681.
- [7] Bazzi, Alessandro & Zanella, Alberto & Masini, Barbara. (2016). A Distributed Virtual Traffic Light Algorithm Exploiting Short Range V2V Communications. *Ad Hoc Networks*
- [8] O. K. Tonguz, W. Viriyasitavat and J. M. Roldan. 2014. Implementing virtual traffic lights with partial penetration: a game-theoretic approach. *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 12, pp. 173-182.
- [9] Sinha, Roopak & Roop, Partha & Ranjitkar, Prakash. (2013). Virtual Traffic Lights+: A Robust, Practical, and Functionally Safe Intelligent Transportation System. *Transport Research Records*. 2381. 10.3141/2381-09.
- [10] Placzek, Bartłomiej. (2014). A self-organizing system for urban traffic control based on predictive interval microscopic model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 34. 75–84.
- [11] R. Oertel, J. Erdmann, Z. Trumpold, P. Wagner (2017): Steuerung von Lichtsignalanlagen auf der Basis von Fahrzeuginformationen – Umsetzung und Feldtests. In *Heureka '17, Optimierung in Verkehr und Transport*. Stuttgart: FGSV Verlag.
- [12] Wu, Jia & Abbas-Turki, Abdeljalil & Moudni, Abdellah. (2012). Cooperative driving: An ant colony system for autonomous intersection management. *Applied Intelligence*. 37. 207-222.
- [13] Cesme, Burak & Furth, Peter. (2013). Self-Organizing Control Logic for Oversaturated Arterials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2356. 92-99.
- [14] M. Ferreira, O. Tonguz, R. Fernandes, H. Conceicao, W. Viriyasitavat. (2012). Methods and systems for coordinating vehicular traffic using in-vehicle traffic control signals enabled by vehicle-to-vehicle communications, Patent WO 2012/009620, January 2012

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AP	Arbeitspaket
AVF	Automatisiertes vernetztes Fahrzeug
DGPS	Differential Global Positioning System
IL	Intersection Leader
LKW	Lastkraftwagen
LSA	Lichtsignalanlage
MST	Meilenstein
PKW	Personenkraftwagen
SCATS	Sydney Coordinated Adaptive Traffic System
SCOOT	Split Cycle Offset Optimisation Technique
RSU	Road Side Unit
V2V	Vehicle to Vehicle
VANET	Vehicular Ad Hoc Network
VTL	Virtual Traffic Light