

# **TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN**

Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List"

Institut für Automobiltechnik Dresden - IAD

Lehrstuhl für Fahrzeugmechatronik

## **DIPLOMARBEIT**

Thema: Entwurf und Evaluierung einer prädiktiven Fahrstrategie auf Basis von Ampel-Fahrzeug-Kommunikationsdaten

Vorgelegt von: Torsten Schubert

Geboren am: 25.02.1984

Matrikel-Nr.: 3016425

zur Erlangung des akademischen Grades

### **DIPLOMINGENIEUR**

(Dipl.-Ing.)

Betreuer: Dipl.-Ing. Philipp Schuricht

Verantwortlicher

Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. Bernard Bäker

Eingereicht am: 15.07.2010

# Technische Universität Dresden

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“  
Institut für Automobiltechnik Dresden (IAD)  
Professur Fahrzeugmechatronik

## Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

Name: **Torsten Schubert** Studiengang: Mechatronik  
Matrikel-Nr.: 3016425 Jahrgang: 2004

Thema: **Entwurf und Evaluierung einer prädiktiven Fahrstrategie auf Basis von Ampel-Fahrzeug-Kommunikationsdaten**

### Ziel der Arbeit:

Die Entwicklung von Kommunikations- und Informationssystemen zwischen Verkehrsampeln und Fahrzeugen stellt ein Untersuchungsschwerpunkt am Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik dar. Das Ziel im Rahmen dieser Diplomarbeit besteht darin auf Basis funktechnisch übertragener Informationen einer Ampelsignalanlage eine prädiktive Fahrstrategie für ein empfangendes Fahrzeug zu entwerfen und den Fahrer somit bei einer energieeffizienten Fahrweise im Bereich einer Ampelkreuzung zu unterstützen. Das zu entwerfende Konzept der prädiktiven Fahrstrategie umfasst die Datenerfassung (Messung des Fahrzeugeigenzustands, Empfang der Ampelinformationen), Datenverarbeitung (Fahrzeug-Positionsbestimmung bzw. Ampelzuordnung, Berechnung eines ampelsignalphasenabhängigen, energetischen optimalen Kreuzungs-Annäherungsprofils bzw. Stillstandverhaltens des Fahrzeugs) sowie Informationsbereitstellung für den Fahrer. Das Konzept ist programmiertechnisch umzusetzen und anhand von praktischen Fahrversuchen an einem geeigneten Versuchsstand zu evaluieren.

### Schwerpunkte der Arbeit:

- Grundlagen, Stand der Technik im Bereich Fahrverlaufsprädiktion, Car2X
- Konzepterstellung und Hardware/Software-Implementierung:
  1. Datenerfassung: Fahrzeug: Zustandsgrößen, Positionsbestimmung  
Ampel: Prognosemodell der Signallaufzeiten
  2. Datenverarbeitung: Prädiktion des Fahrverlaufs aus Ampel-Informationen (Variation durch Kolonnenverkehr, ÖPNV-Anforderung) und Fahrzeugeigenzustand  
Berechnung von energetisch günstigen Fahrprofilen
  3. Informationsbereitstellung: Gestaltung einer Fahrerinformationsanzeige
- Planung, Durchführung und Auswertung von Fahrversuchen an Beispielkreuzung
- Berechnungen zum Einsparpotential (Energetisches Bewertungsmodell)
- Ausführliche Darlegung, Dokumentation und Visualisierung der Ergebnisse

Betreuer: Dipl.-Ing. P. Schuricht

Ausgehändigt am: 15.01.2010

Einzureichen am: 15.07.2010



Prof. Dr.-Ing. B. Bäker  
Betreuender Hochschullehrer



Prof. Dr.-Ing. B. Bäker  
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

## **SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit vollkommen selbstständig verfasst habe. Es wurden keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Die wörtlichen oder sinngemäß übernommenen Zitate habe ich als solche kenntlich gemacht.

Dresden, den 15.07.2010

Torsten Schubert

## KURZFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wird eine prädiktive Fahrstrategie vorgestellt, die auf Basis von Ampel-Fahrzeug-Kommunikationsdaten generiert wird. Dazu wird ein aktueller Ansatz für eine prädiktive Fahrstrategie zur Annäherung an eine Lichtsignalanlage (LSA) [HAN09] untersucht. Es werden verschiedene Optimierungsansätze deutlich, von denen ein großer Teil bei der Systemerweiterung berücksichtigt wird.

Bei der Analyse konnte gezeigt werden, dass die bisherige Strategieempfehlung durch den Einfluss vorausfahrender Verkehrsteilnehmer eingeschränkt wird. Es ergaben sich potentielle Problemsituationen, welche sich im realen Straßenverkehr negativ auf die Funktionalität des FAS auswirken. Für Anfragen des ÖPNV wurde ermittelt, dass keine allgemeingültigen Aussagen über die Eignung der Assistenzfunktion gegeben werden können.

Die wesentliche Neuerung zu bisheriger Strategieansätze für die Annäherung an Knotenpunkte mit LSA ist die Berücksichtigung anderer Verkehrsteilnehmer. Dazu werden die neuen Größen effektive Freigabezeit  $t_{FBI,eff}$  und virtuelle Position der Haltelinie  $s_{LSA,virt}$  eingeführt, auf Basis derer die Strategieempfehlung des Fahrerassistenzsystems (FAS) an die Anzahl wartender Fahrzeug angepasst wird.

Zur Untersuchung des möglichen Energieeinsparpotentials durch den Einsatz eines FAS wurde ein Simulationsmodell in MATLAB/SIMULINK entwickelt. Mit dessen Hilfe konnten verschiedene Situationen dargestellt werden, an denen der Einfluss der Funkreichweite sowie die Auswirkungen der Warteschlange auf das FAS verdeutlicht werden. Ferner kann der positive Effekt auf den Kraftstoffverbrauch und die Haltezeit an der LSA bestätigt werden. Das Simulationsmodell stellt eine gute Grundlage für weiterführende Untersuchung dar und kann an unterschiedliche Situationen angepasst werden.

Um den Nutzen auch praktisch zu verifizieren wird eine Reihe von Fahrversuchen durchgeführt. Dem Fahrer wird dabei die Strategie in einem Display visualisiert. Für Situationen, in denen der Fahrzeugstillstand vermeidbar ist erhält dieser eine Geschwindigkeitsempfehlung. Ist ein Stillstand nicht vermeidbar, so erfolgt unmittelbar vor der Haltelinie, die Ausgabe der Restlaufzeit der Rotphase. Bei der Versuchsauswertung wird das Einsparpotential deutlich. Durch eine entwickelte GUI wird dem Fahrer eine Strategie auf dem Display visualisiert. Innerhalb mehrerer Versuchsfahrten konnten das FAS erprobt und in der anschließenden Versuchsauswertung klar die Verbesserungen aufgezeigt werden.

## **ABSTRACT**

In this paper a predictive driving strategy is presented, which is generated based on car to infrastructure communication data. An actual approach for a driver assistance system has been analyzed to identify room for improvements. The additional benefit of the presented work is the consideration of other road users driving ahead of the ego-vehicle in the process of finding the optimal speed for approaching the traffic-light.

A MATLAB/SIMULINK model has been developed, which allows the simulation of different traffic situations to investigate the fuel consumption benefit of a vehicle equipped with the considered system. It illustrates the influence of the radio range and the length of the queue in front of the stop line. Furthermore the positive effect to the fuel consumption of the developed system could be evaluated. The simulation model is a good basis for further tests and could be easily adapted to various situations and vehicles.

In addition to the simulation, a human machine interface was developed for evaluating the advanced driver assistance system in test runs. The driver assistance system was tested in several situations to show the benefit of the system. It has been tested via multiple test runs. In the following test evaluation the improvement could clearly be shown.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>i</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>iii</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	2
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>3</b>
2.1 System Fahrer-Fahrzeug-Verkehr.....	3
2.2 Fahrerassistenzsysteme .....	4
2.2.1 Klassifizierung nach Art der Fahrerunterstützung.....	4
2.2.2 Klassifizierung nach Fahraufgabenebene .....	5
2.2.3 Prädiktive Fahrerassistenzsysteme.....	6
2.2.4 Kreuzungsassistenz .....	6
2.3 Kooperative Systeme.....	7
2.3.1 Forschungsaktivitäten in Europa .....	8
2.3.2 Fahrerassistenzsysteme zur Reduktion der Fahrzeugemissionen .....	9
2.4 Berechnung des Kraftstoffverbrauches.....	10
2.5 Positionsbestimmung im Strassenverkehr.....	12
2.5.1 Aufbau eines Satellitennavigationssystems .....	12
2.5.2 Ablauf einer Positionsbestimmung .....	13
2.5.3 Fehlerquellen und Ursachen bei der Positionsbestimmung .....	14
2.5.4 Genauigkeit der Positionsbestimmung .....	14
2.5.5 Verarbeitung der Positionsdaten .....	15
2.6 Lichtsignalanlagen (LSA).....	16
2.6.1 Definition wichtiger Begriffe .....	17
2.6.2 Überblick über Steuerungsverfahren .....	18
2.6.3 Umschaltung zwischen Signalprogrammen .....	20
2.6.4 Bevorrechtigungsarten für den ÖPNV.....	21
<b>3 Analyse des bestehenden Systems</b> .....	<b>24</b>
3.1 Fahrprofile zur Annäherung an LSA.....	24
3.2 Nutzen des Assistenzsystems.....	24
3.3 Ausgangslage des bisherigen Fahrerassistenzsystems.....	25
3.3.1 Phasenzyklus.....	26
3.3.2 Fahrzeugortung.....	27

3.3.3	Kommunikationsdaten des Ampelmoduls.....	28
3.3.4	Strategieansatz .....	29
3.4	Analyse der Strategieempfehlung.....	31
3.5	Optimierungsansätze.....	32
<b>4</b>	<b>Erweiterter Systementwurf .....</b>	<b>35</b>
4.1	Rahmenbedingungen und Vorgaben.....	35
4.2	Entscheidungssystem .....	35
4.3	Einfluss von Fahrzeugkolonnen.....	36
4.4	Effektive Freigabezeit und Rückstaulänge .....	38
4.5	Untersuchung der Geschwindigkeitsregelgrenzen.....	38
4.6	ÖPNV - Umgang mit dynamischen Signallaufzeiten .....	41
4.7	Ermittlung einer Fahrstrategie.....	42
4.8	Zusammenfassung der Optimierung.....	44
<b>5</b>	<b>Simulative Untersuchung .....</b>	<b>45</b>
5.1	Longitudinalmodell - Intelligent Driver Model – IDM .....	45
5.2	Modell zur Schätzung des Kraftstoffverbrauches.....	47
5.3	Aufbau des SIMULINK-Modells .....	49
5.4	Parametervariation und Ergebnisse .....	50
5.4.1	Rahmenbedingungen und Vorgaben.....	51
5.4.2	Einfluss der Funkreichweite.....	51
5.4.3	Einfluss der Pulklänge.....	54
5.5	Zusammenfassung .....	56
<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchung .....</b>	<b>57</b>
6.1	Versuchsaufbau .....	57
6.2	Mensch Maschine Schnittstelle.....	59
6.3	Programmstruktur.....	60
6.4	Versuchsdurchführung.....	62
6.5	Ergebnis und Zusammenfassung.....	63
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>66</b>
<b>A</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>C</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>D</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>X</b>

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
A-GPS	Assisted-GPS
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
C2C	Car to Car Communication (siehe V2V)
C2I	Car to Infrastructure Communication (siehe V2I)
CAN	Controller Area Network – asynchrones, serielles Bussystem zur Vernetzung von Steuergeräten im Automobil
D-GPS	Differential-GPS
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EU	Europäische Union
FAS	Fahrerassistenzsystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPRMC	Recommended Minimum Sentence C – empfohlener Minimumdatensatz Datensatz im NMEA-Protokoll
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HL	Haltelinie
HMI	Human-Machine-Interface
IAD	Institut für Automobiltechnik Dresden
IDM	Intelligent Driver Model – Modell des intelligenten Fahrers für Simulationen
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITS	Intelligent Transportation Systems
IV	Individualverkehr
KFZ	Kraftfahrzeug
LCD	Liquid Crystal Display
LKW	Lastkraftwagen
LSA	Lichtsignalanlage
MIV	Motorisierter Individualverkehr



MSS	Motor-Start-Stopp-Funktion
NFZ	Nutzfahrzeug
NMEA	National Marine Electronic Association
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PAP	Programmablaufplan
PKW	Personenkraftwagen
RDS	Radar Distance System
RiLSA	Richtlinien für Lichtsignalanlagen
RLZ	Restlaufzeit der Signalphasen
SCOOT	Split Cycle Offset Optimisation Technique (LSA Steuerungsverfahren)
SG	Signalgruppe – alle Signalgeber einer Knotenpunktzufahrt
TDI	Turbocharged Direct Injection – Markenbezeichnung für Turboaufgeladene Dieselmotoren mit Direkteinspritzung des VW Konzerns
TMC	Traffic Message Channel – digitale Informationen im nichthörbaren Bereich des UKW Signals
UTC	Universal Time Coordinated – Koordinierte Weltzeit (aus GPS Daten)
UZP	Umschaltzeitpunkt
V2I	Vehicle to Infrastructure Communication (siehe C2I)
V2V	Vehicle to Vehicle Communication (siehe C2C)
VANet	Vehicular Ad Hoc Network
VLA	Verkehrsleitassistenz
WLAN	Wireless Local Area Network

# SYMBOLVERZEICHNIS

Zeichen	Einheit	Bedeutung
<b>Grundlagen der Fahrzeuglängsdynamik</b>		
$A$	$[m^2]$	Querspanntfläche (projizierte Stirnfläche)
$\alpha_{St}$	$[^\circ]$	Steigungswinkel
$b_e$	$[g/kWh]$	spezifischer Kraftstoffverbrauch
$c_W$		Luftwiderstandsbeiwert
$d_{LSA}$	$[m]$	Entfernung zur Haltelinie
$f_r$		Rollwiderstandsbeiwert
$F_{LW}$	$[N]$	Luftwiderstand
$F_R$	$[N]$	Rollwiderstand
$F_{St}$	$[N]$	Steigungswiderstand
$F_W$	$[N]$	Gesamtfahrwiderstand
$g$	$[m/s^2]$	Gravitation / Erdbeschleunigung
$m_{Fzg}$	$[kg]$	Fahrzeuggesamtmasse (inkl. Zuladung)
$P$	$[W]$	Leistung
$\rho_K$	$[g/m^3]$	Kraftstoffdichte
$\rho_L$	$[g/m^3]$	Luftdichte
$t_{abg}$	$[s]$	abgelaufene Zeit der Grünphase
$T_{g,i}$	$[s]$	Gesamtdauer der Grünphase i (LSA)
$t_{gb,i}$	$[s]$	Beginn Grünzeit/Freigabe (LSA) – Phase i
$t_{ge,i}$	$[s]$	Ende Grünzeit/Freigabe (LSA) - Phase i
$v_f$	$[km/h]$	Fahrgeschwindigkeit
$v_{Wind}$	$[km/h]$	Windgeschwindigkeit
<b>Grundlagen der Verkehrstechnik</b>		
$t_0$	$[s]$	Synchronisationszeitpunkt
$t_U$	$[s]$	Umlaufzeit
$t_{F,min}$	$[s]$	Minimalfreigabezeit
$t_Z$	$[s]$	Zwischenzeit

Zeichen	Einheit	Bedeutung
<b>Simulative Untersuchung</b>		
IDM – Modell des intelligenten Fahrers [TRE07]		
$a_{int}$	$[m/s^2]$	maximale Wunschbeschleunigung
$b_{int}$	$[m/s^2]$	maximale Wunschverzögerung
$\delta$		Beschleunigungsexponent
$s^*$	$[m]$	momentaner minimaler Wunschabstand
$s_0$	$[m]$	Minimalabstand zum Vordermann bei Stillstand
$T$	$[s]$	zeitlicher Sicherheitsabstand
$v$	$[km/h]$	momentane Fahrgeschwindigkeit
$v_0$	$[km/h]$	Wunschgeschwindigkeit
$\Delta v$	$[km/h]$	Relativgeschwindigkeit zum Vordermann
Modell zur Verbrauchsabschätzung nach Akcelik und Biggs [AKC86]		
$a$	$[m/s^2]$	Beschleunigung ( $a > 0$ ) / Verzögerung ( $a < 0$ )
$\alpha$	$[ml/s]$	Leerlaufverbrauch in ml/s
$b_1$	$[kN]$	Zugkraftanteil Rollwiderstand
$b_2$	$[kg/m]$	Zugkraftanteil Luftwiderstand
$\beta_1$	$[ml/kJ]$	Verbrauchsparameter bei Konstantfahrt
$\beta_2$	$[ml/(kJ (m/s^2))]$	Verbrauchsparameter bei Beschleunigung ( $a > 0$ )
$\Delta F$	$[ml/s]$	Kraftstoffverbrauch
$G$		Prozentuale Steigung
$M_v$	$[kg]$	Gesamtfahrzeugmasse
$R_T$	$[kN]$	Gesamtfahrwiderstand
$v$	$[m/s]$	momentane Geschwindigkeit
Parameter und Zielgrößen der Simulation		
$d_{funk}$	$[m]$	Funkreichweite
$\Delta F_d$	$[\%]$	Verbrauchsverbesserung
$N_{Pulk}$		Pulklänge
$t_{gb}$	$[s]$	Freigabebeginn
$\Delta t_d$	$[s]$	Reisezeitgewinn
$\Delta t_{std}$	$[s]$	Stillstandszeitdifferenz

# 1 EINLEITUNG

Die Mobilität des Einzelnen hat in unserer modernen Gesellschaft einen besonders hohen Stellenwert. Dabei gewährt das Automobil ein Höchstmaß an individueller Mobilität bei vergleichsweise geringem Zeitaufwand und großer Reichweite. Damit verbunden sind jedoch der zum Kraftstoffverbrauch proportionale Ausstoß von Schadstoffen und die sich ergebende Umweltbelastung. [BAC05]

Ein entscheidender Einflussfaktor auf den Kraftstoffverbrauch sind die Fahrprofile bei der Annäherung an Lichtsignalanlagen (LSA) sowie die Wartezeiten an diesen. Die heutige Infrastruktur ist jedoch ohne Lichtsignalanlagen nahezu undenkbar geworden, da diese bei Einhaltung der Freigabe und Sperrzeiten jederzeit eine sichere Kreuzungsquerung der Verkehrsteilnehmer gewährleisten. Unter diesem Aspekt gibt es jedoch ebenso einen Konflikt mit der Akzeptanz bei den Fahrzeugführern, welche durch die Dauer der Wartezeiten an der Ampel bestimmt wird. Die Ungewissheit darüber wann eine Richtungsfreigabe erfolgen wird, hat enorme Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch und die dadurch zwangsläufig verursachten Emissionen. Hierzu gibt es zahlreiche Entwicklungen im Bereich der Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen [RIC05] und [PRI08]. Zudem beschäftigen sich [AUD09], [AKT10] und [INV10] mit fahrzeugseitiger Beeinflussung des Fahrverlaufes.

## 1.1 MOTIVATION

Die Untersuchungen in [DOR04], [NEU03] und [RIC05] haben gezeigt, dass bereits eine vorausschauende Fahrweise ein enormes Potential zur Kraftstoffeinsparung aufweist. Die Umsetzung dieser Fahrweise hängt jedoch zum Großteil vom Fahrzeugführer ab und unterliegt daher großen Schwankungen. Fahrerassistenzsysteme sollen deshalb in Zukunft verstärkt zu einer verbrauchsgünstigen Fahrweise beitragen.

[DOR04] beschreibt ein System, welches den Fahrer bei einer vorausschauenden Fahrweise unterstützt. Dabei wird nicht vorrangig das Verhalten bei der Zufahrt zu Knotenpunkten mit LSA behandelt, sondern auch Rücksicht auf Steigungen, vorausliegende Geschwindigkeitsbegrenzungen und die Routenwahl genommen, sodass auf der gesamten Fahrstrecke Einsparungen möglich sind.

Das in [HAN09] erarbeitete Fahrerassistenzsystem unterstützt den Fahrer bei der Wahl der Fahrgeschwindigkeit. Dabei schlägt es dem Fahrzeugführer eine situationsabhängige Strategie vor, sodass dieser schnellstmöglich und verbrauchsgünstig die Kreuzung passieren kann. Der Einfluss von Fahrzeugen, die an der Haltelinie (HL) auf die Richtungsfreigabe warten, wurde dabei jedoch nicht berücksichtigt. Folglich kann das theoretisch mögliche Verbesserungspotential nur unter idealen Voraussetzungen erzielt werden.

## 1.2 ZIELSETZUNG DER ARBEIT

In der vorliegenden Arbeit wird eine Erweiterung des Assistenzsystems von [HAN09] vorgeschlagen, welches den Fahrer bei einer vorausschauenden Fahrweise, speziell bei der Annäherung an Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen, unterstützen soll und welches dabei den Einfluss vorausfahrender Verkehrsteilnehmer berücksichtigt.

In der Literatur finden sich einige Ansätze mit Bezug auf die Geschwindigkeitsvorgabe bei der Annäherung an lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte ([DOR04], [RIC05]).

Die Ergebnisse der Untersuchungen aus [DOR04] zeigen, dass bereits durch eine frühzeitig eingeleitete Verzögerungsstrategie enorme Verbrauchsreduzierungen möglich sind. In der Praxis konnte das Einsparpotential der umgesetzten Stillstandsvermeidungsstrategie jedoch, bedingt durch dichtes Verkehrsaufkommen, nicht nachgewiesen werden, da andere Verkehrsteilnehmer im Algorithmus keine Berücksichtigung finden. Die vorliegende Arbeit adressiert genau diesen Umstand und schlägt ein FAS vor, welches den Einfluss vorausfahrender Fahrzeuge und ÖPNV-Bevorrechtigungen untersucht um die vorhandene Fahrstrategie zu erweitern.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss vorausfahrender Fahrzeuge zu untersuchen und die Strategieempfehlung daran anzupassen, um das erreichbare Potential einer effizienten Fahrweise nicht nur bei freier Fahrt auszuschöpfen.

## 1.3 AUFBAU DER ARBEIT

Wesentliche Grundlagen auf dem Gebiet der Fahrerassistenzsysteme sowie aktuelle Entwicklungen im Bereich der Car-2-Infrastructure Kommunikation (C2I) werden im **Kapitel 2** geschildert. Zudem werden Fakten der Lichtsignalsteuerung und Bevorrechtigungsmaßnahmen des ÖPNV behandelt.

In **Kapitel 3** schließt sich eine detaillierte Darlegung des aktuellen Systemaufbaus an. Nach einer Analyse der vorhandenen Soft- und Hardware und des aktuellen Prototyps, werden wichtige Verbesserungsansätze aufgezeigt. Diese werden innerhalb **Kapitel 4** aufgegriffen und detailliert bearbeitet. Es werden verschiedene Erweiterungen des Systems erarbeitet. Darauf aufbauend wird zum Vergleich des erweiterten Ansatzes mit dem Ausgangssystem in **Kapitel 5** eine Simulation in MATLAB/Simulink vorgestellt. Diese baut auf dem Intelligent-Driver-Modell (IDM) auf [TRE07] welches in Simulink implementiert wird.

Der entwickelte Algorithmus wird in **Kapitel 6** unter Versuchsbedingungen getestet. Dazu wird eine Mensch-Maschine-Schnittstelle genutzt, welche die Strategieempfehlung an den Fahrzeugführer übermittelt und eine einfache Umsetzung der Annäherung an die LSA ermöglicht. Anhand verschiedener Annäherungssituationen wird die Funktionsweise an einer Beispielkreuzung erprobt.

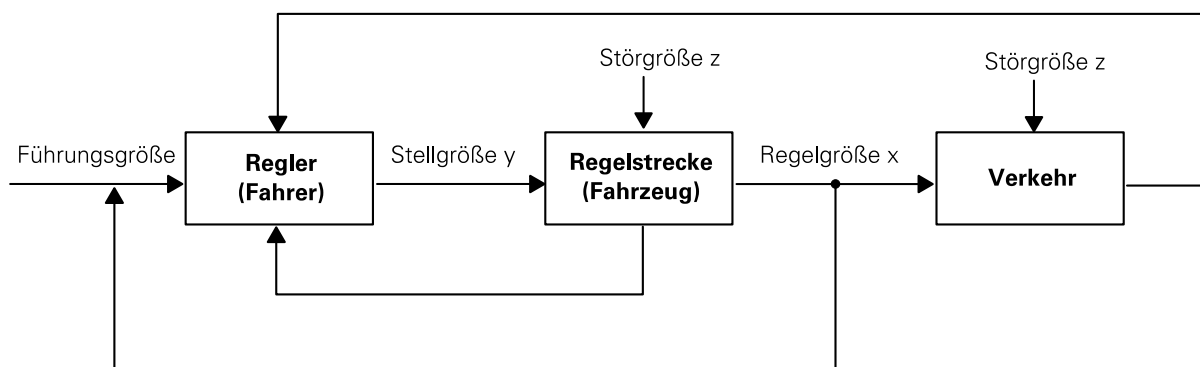
**Kapitel 7** fasst schließlich die Untersuchungsergebnisse zusammen und erläutert den Nutzen der Funktion und die sich ergebenden Verbesserungen in Bezug auf das ursprüngliche System. Zudem werden im Ausblick Ansätze für weitergehende Untersuchungen und Vorschläge zur weiteren Vertiefung gegeben.

## 2 STAND DER TECHNIK

Zur Bearbeitung des Themas wird zunächst der aktuelle Entwicklungsstand auf dem Gebiet der Fahrerassistenzsysteme recherchiert. Zudem ist es sinnvoll, auf die Grundlagen der Positionsbestimmung sowie die kabellose Informationsübermittlung einzugehen, welche die Basis für eine Kommunikation zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur bilden. Weiterführend werden Forschungsprojekte vorgestellt, welche sich bereits mit dem Thema C2X-Kommunikation auseinandergesetzt haben, auseinandersetzen oder in Zukunft auseinandersetzen werden.

### 2.1 SYSTEM FAHRER-FAHRZEUG-VERKEHR

Die Fortbewegung im Straßenverkehr ist ein Prozess, der durch einen Regelkreis beschrieben werden kann. Der Fahrzeugführer ist, bei der Bewältigung seiner Transportaufgabe mit seinem Fahrzeug im Verkehrsraum, Bestandteil einer vielseitigen Interaktion. Seine Handlungen schließen die Informationsaufnahme, deren Verarbeitung zur Gewinnung von Entscheidungskriterien, das weitere Handeln und schließlich die Umsetzung dieser Kriterien durch die sich im Fahrzeug befindlichen Steuerelemente und –einrichtungen ein. Diese Überlegungen führen auf ein Regelsystem gemäß **Abbildung 2-1**. [DOR04]



**Abbildung 2-1:** Regelkreis Fahrer – Fahrzeug - Verkehr (vgl. [DOR04] S. 16)

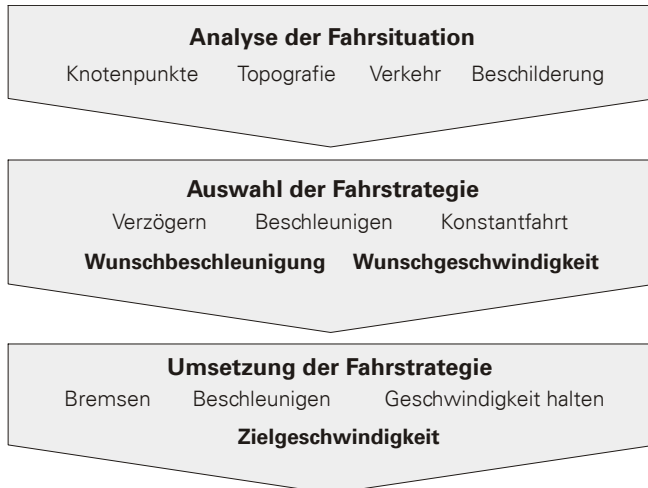
Die Regelgröße  $x$  des Systems ist die Fahrweise. Die Stellgröße  $y$  ist die Längs- und Querregelung des Fahrzeuges (Beschleunigen, Bremsen und Lenken). Der Fahrer ist der Regler des Systems und wählt, aufbauend auf den zur Verfügung stehenden Informationen über den vorausliegenden Streckenabschnitt, die Teilgrößen (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Spurlage, etc.). Die Rückmeldung erhält er über die Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs (Regelstrecke). Korrekturen erfolgen, sobald die Erwartungshaltung des Fahrers nicht mehr mit der aktuellen Situation übereinstimmen. Störgrößen  $z$ , welche z.B. durch Witterungsbedingungen bestimmt werden, beeinflussen zudem das Fahrerverhalten. Der Fahrer als Regler besitzt somit die größte Bedeutung bei der effizienten und vorausschauenden Fahrweise.

## Vorausschauendes Fahren

Eine vorausschauende Fahrweise lässt sich nach [NEU03] grundsätzlich in die drei Module:

- Analyse der Fahrsituation (Informationsaufnahme),
- Auswahl einer geeigneten Fahrstrategie (Informationsverarbeitung) und
- Umsetzung dieser Strategie (Reaktion) durch den Fahrzeugführer

unterteilen.



**Abbildung 2-2:** Grundaufbau der vorausschauenden Fahrstrategie und ([NEU03] S. 86)

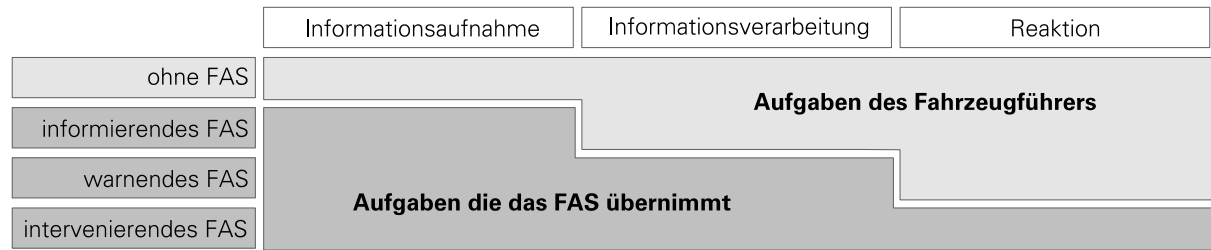
Die Grundmanöver innerhalb der drei Module veranschaulicht **Abbildung 2-2**. Die Wunschbeschleunigung und die Wunschgeschwindigkeit sind Ergebnis der Informationsverarbeitung. Sie bilden die Eingangsgrößen für die Umsetzung der Fahrstrategie durch den Fahrer. Diese wiederum liefert eine situationsabhängige Zielgeschwindigkeit. Dabei werden alle drei Teilaufgaben durch den Fahrer übernommen. In schwierigen Situationen, die hohe Konzentration des Fahrers erfordern, kann das zu möglichem Fehlverhalten beitragen. Darum werden Fahrerassistenzsysteme entwickelt, die den Fahrzeugführer bereits heute sehr gut bei der Erfüllung seiner Transportaufgabe unterstützen, indem sie wichtige Aufgaben übernehmen können.

## 2.2 FAHRERASSISTENZSYSTEME

Fahrerassistenzsysteme sind elektronische Zusatzeinrichtungen in Kraftfahrzeugen. Sie dienen überwiegend der Erhöhung der Sicherheit oder auch der Steigerung des Fahrkomforts. Eine Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen. Zwei sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

### 2.2.1 KLASSIFIZIERUNG NACH ART DER FAHRERUNTERSTÜTZUNG

Es wird zwischen informierenden, warnenden und intervenierenden (eingreifenden) Assistenzsystemen unterschieden. [BEN06] Diese Überlegungen führen auf den in **Abbildung 2-3** dargestellten Zusammenhang



**Abbildung 2-3:** Klassifizierung der Assistenzfunktion nach Art der Fahrerunterstützung (vgl. [BEN06] S. 4)

Fahrerassistenzsysteme können nach verschiedenen Sachverhalten klassifiziert werden. Einerseits ist die Unterteilung der FAS nach Fahraufgabe möglich, andererseits erfolgt oft eine Einteilung nach der Art der Fahrerunterstützung. Moderne FAS sind dazu konzipiert, den Fahrer bei seinen täglichen Aufgaben im Straßenverkehr zu unterstützen. Diese Aufgaben lassen sich in die drei Gruppen Planen, Führen und Stabilisieren einteilen, wonach die FAS klassifiziert werden können. [WIN09].

## 2.2.2 KLASSIFIZIERUNG NACH FAHRAUFGABENEBENE

### Systeme auf der Planungsebene

Mittlerweile sind Systeme der Planungsebene bei vielen Automobilherstellern etabliert. Dazu zählen Navigationsgeräte, welche die Route zwischen aktuellem Standort und gewünschtem Zielort planen und während der Fahrt Hinweise über den Streckenverlauf geben. Weicht der Fahrer von der vorgeschlagenen Fahrtroute ab, errechnet das System automatisch eine neue Route. Zudem können bei der Routenplanung eingehende Staumeldungen berücksichtigt werden, welche über Radiosender (TMC) übermittelt werden.

### Systeme auf der Führungsebene

Zu Assistenzsystemen auf der Führungsebene zählen Tempomaten, welche eine vom Fahrzeugführer vorgegebene Geschwindigkeit halten, jedoch jederzeit durch diesen überstimmt und somit deaktiviert werden können. Eine Erweiterung dieses Systems stellt der Abstandsregeltempomat (ACC) dar. Dieser regelt gleichzeitig den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und stellt die erforderliche Geschwindigkeit ein, um diesen beizubehalten.

Ebenfalls in diese Kategorie gehören Spurhalteassistenten, welche die Position des Fahrzeuges in der zugeordneten Fahrspur schätzen und den Fahrer bei einem ungewollten Spurwechsel warnen, um das Fahrzeug durch das Eingreifen des Fahrzeugführers in der Spur zu halten. Die Warnung erfolgt meist akustisch oder haptisch.

### Systeme auf der Stabilisierungsebene

Assistenzsysteme auf der Stabilisierungsebene sind so konzipiert, dass sie in kritischen Fahrsituationen ausgelöst werden und in das Geschehen eingreifen um die Stabilität des Fahrzeuges zu erhalten bzw. zu verbessern. Serienmäßigen Einsatz in Neufahrzeugen findet hierbei das Anti-Blockier-System (ABS), welches das Blockieren der Räder bei Gefahrenbremsungen verhindert damit das Fahrzeug kontrollierbar bleibt. Ein weiteres wichtiges System in dieser Kategorie ist die Elektronische-Stabilitätskontrolle (ESP). Diese hilft dem Fahrzeugführer bei Kurvenfahrten, durch gezielte Brems Eingriffe an den entsprechenden



Rädern, das Fahrzeug am Über- bzw. Untersteuern zu hindern. Laut [ATZ10] wird ESP bereits ab November 2011 für alle neuen PKW-Modelle und ab 2014 für den Einsatz in jedem Neuwagen (PKW) vorgeschrieben.

Der nächste Schritt in der Entwicklung von FAS geht in Richtung vorausschauender Assistenzsysteme. Diese werden Systeme auf der Stabilisierungsebene entlasten, indem sie kritische Situationen bereits frühzeitig erkennen und entsprechend reagieren können.

### **2.2.3 PRÄDIKTIVE FAHRERASSISTENZSYSTEME**

Prädiktion (Extrapolation/Schätzung) ist „die (rechnerische) Vorhersage der Lage- und Bewegungsinformationen anhand der bekannten Vergangenheit in Abhängigkeit physikalischer Eigenschaften des Objekts (Fahrdynamik des vorausfahrenden Fahrzeugs)“. ([WIN09] S.180)

Diese Aussage ist auf das Eigenfahrzeug übertragbar, da auch hier Daten zur Berechnung vorliegen, welche eine Vorhersage der Lage- und Bewegungsinformationen ermöglichen. Aus der Fusion der vorliegenden Informationen (Eigenfahrzeug und Objekt) lassen sich somit bevorstehende Kollisionen erkennen und durch den Eingriff eines geeigneten FAS in ihren Auswirkungen mindern oder sogar gänzlich vermeiden.

Prädiktive Assistenzsysteme müssen jedoch nicht zwangsläufig sicherheitsrelevante Funktionen ausüben, sondern können ebenso die Effizienz steigern indem sie sozusagen, unter Einbeziehung vorhandener Digitaler Karten, die Getriebesteuerung an den Streckenverlauf anpassen [AIS10]. Ebenso gibt es Systeme [SCH09], welche den Gurt fahradaptiv straffen und somit den Komfort steigern.

### **2.2.4 KREUZUNGSASSISTENZ**

Hauptunfallursache vor allem im innerstädtischen Verkehr ist nach wie vor das Fehlverhalten von Verkehrsteilnehmern im Bereich von Kreuzungen und Einmündungen. „Kreuzungen sind die Knotenpunkte der Verkehrsströme. Sie erfordern eine deutlich höhere Aufmerksamkeit des Fahrers und sind nach wie vor Unfallschwerpunkte.“ [AKT10]

Um Ansatzpunkte für geeignete Fahrerassistenzsysteme zu finden, werden Fehlerursachen untersucht und daraus entsprechende Ansätze abgeleitet. [WIN09]

Zu diesen Fehlern im Kreuzungsbereich zählen:

- Fehlinterpretation der Situation, d.h. korrekte Wahrnehmung der Situation, jedoch falsche Interpretation und somit unpassende Reaktion. Typisches Beispiel ist die Fehleinschätzung der Verkehrsregelung oder der Geschwindigkeit vorfahrtsberechtigter Fahrzeuge.
- Unaufmerksamkeit, d.h. der Fahrzeugführer ist von der eigentlichen Fahraufgabe abgelenkt, was zu stark verlängerter Reaktionszeit führt, z.B. durch Navigationsgerät, Telefon, Autoradio.
- Mangelnde Berücksichtigung möglicher Sichtbehinderungen an Kreuzungen. Als Beispiele sind die A-Säule des Fahrzeuges, parkende Fahrzeuge, Bebauung und Bepflanzung sowie temporäre Sichtbehinderungen wie entgegenkommende Linksabbieger zu nennen.

## 2.3 KOOPERATIVE SYSTEME

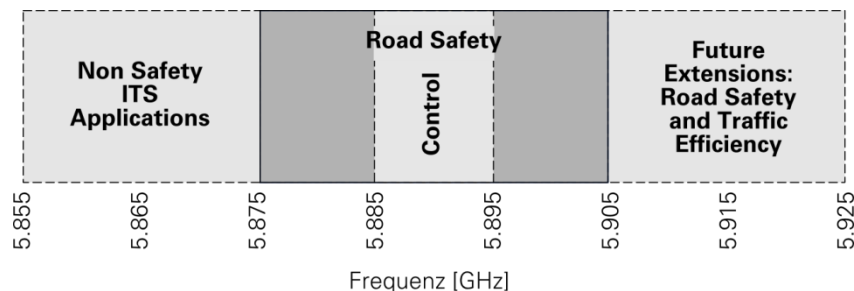
Neben der Kommunikation eines Fahrzeuges über rundfunk- oder mobilfunkbasierte Dienste, um beispielsweise Meldungen des TMC zu empfangen, besteht ein zunehmender Bedarf an bidirektionalen Funkverbindungen zu anderen Verkehrsteilnehmern. Dabei wird zwischen der Kommunikation von Fahrzeugen untereinander – Car to Car (C2C) – und der Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur-Komponenten – Car to Infrastructure (C2I) unterschieden. Auch die Bezeichnungen Vehicle to Vehicle (V2V) und Vehicle to Infrastructure (V2I) finden in der Literatur vielfach Verwendung. [WIN09]

Die Anwendung der C2X-Kommunikation ist sowohl für Unterhaltungsdienste, als auch für sicherheitsrelevante Dienste vorstellbar. Unterhaltungsszenarien sind etwa das Telefonieren und das Versenden bzw. Empfangen von Kurzmitteilungen zwischen verschiedenen Teilnehmern (C2C). Weiterhin zählen ortsbezogene Dienste, die dem Nutzer Informationen, wie Sehenswürdigkeiten in näherer Umgebung, bereitstellen (C2I) hinzu.

Eine Vernetzung zwischen verkehrsseitiger Telematik und in Fahrzeugen verbauten Fahrerassistenzsystemen kann entscheidend zu folgenden Punkten beitragen:

- Erhöhung der Straßenverkehrssicherheit
- Unterstützung des Fahrers bei der Unfallvermeidung
- Unterstützung des Fahrers bei der Auswahl einer optimalen Fahrtroute
- effizientere Nutzung von fossilen Kraftstoffen
- Effizienzsteigerung der Verkehrssysteme
- Bereitstellung von Informationen über das Straßennetz in Echtzeit

Ein großes Potential wird dabei besonders hinsichtlich der Erhöhung der Verkehrssicherheit und der Effizienzsteigerung des Verkehrssystems gesehen. [RIE10]



**Abbildung 2-4:** Aufteilung des 5.9 GHz Frequenzbandes (vgl. [LEI08] S. 6)

Ein erster Schritt hinsichtlich der Standardisierung für den Einsatz der C2X Kommunikationstechnologie in Europa wurde erreicht. Die EU-Kommission hat im August 2008 das 5.9 GHz-Band (5.855-5.925 GHz) für die Fahrzeugkommunikationssysteme in Europa lizenziert.

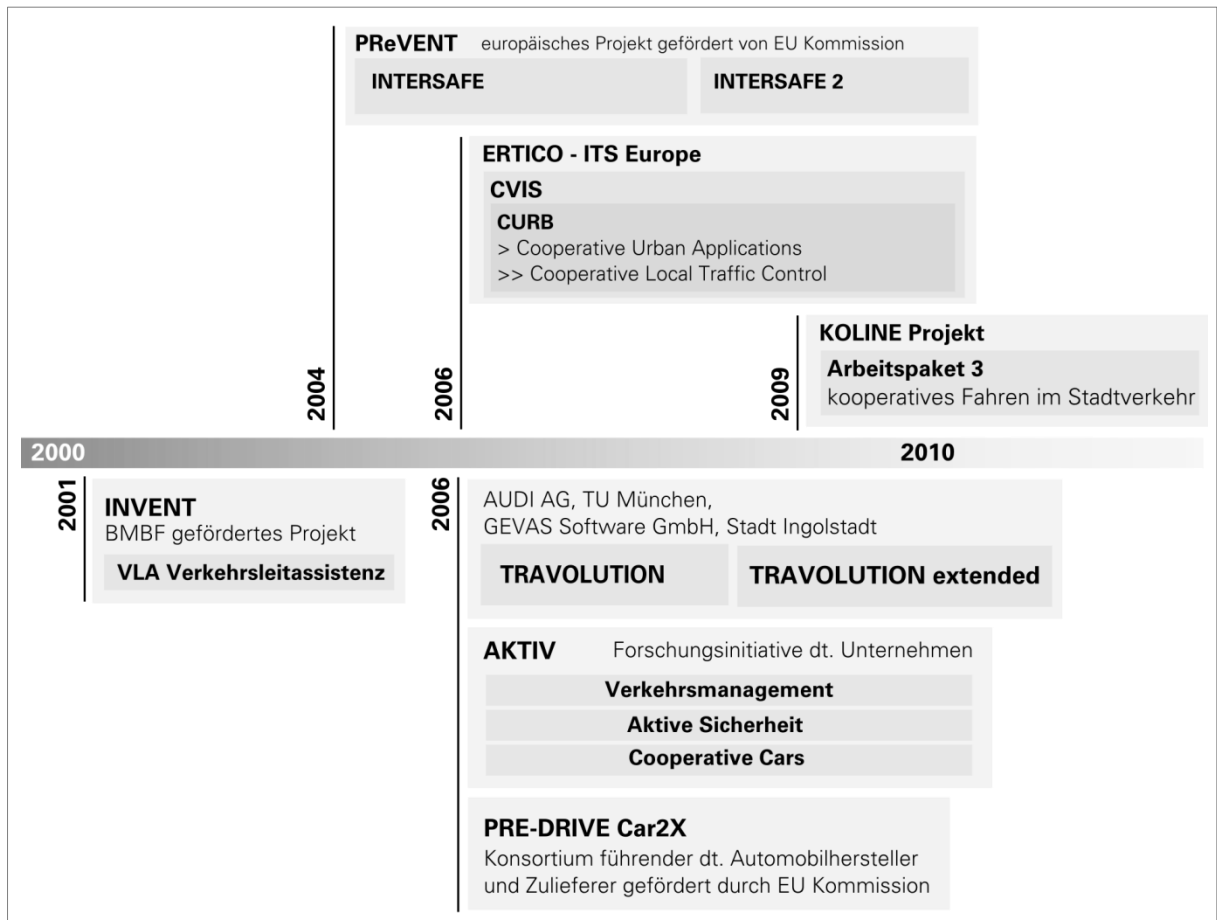
**Abbildung 2-4** zeigt die Aufteilung des Bandes für Nachrichten unterschiedlicher Priorität.

### 2.3.1 FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN IN EUROPA

Die Forschung auf dem Gebiet der C2X Kommunikation ist in Europa sehr stark ausgeprägt. Allein in Deutschland gibt es eine große Zahl von aktuellen Projekten. Einen Überblick über einige wichtige Forschungsprojekte im Bereich der Verkehrseffizienz und Kreuzungsassistenz liefert **Abbildung 2-5**.

Die verschiedenen Projekte verfolgen dabei zwei grundlegende Ziele.

- Erhöhung der Sicherheit
- Steigerung der Verkehrseffizienz



**Abbildung 2-5:** Übersicht über C2X Forschungsaktivitäten in Europa

#### PreVENT Intersafe 1&2

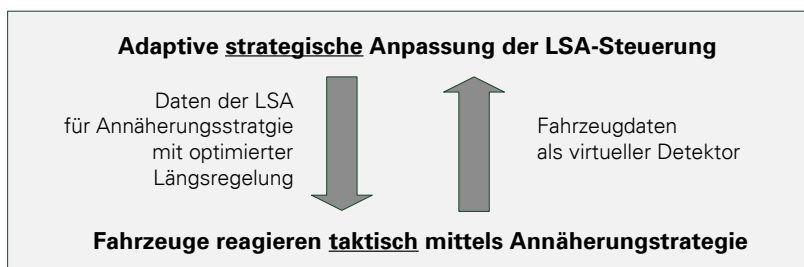
PreVENT ist ein Projekt der BMW Group, welches verschiedene Teilprojekte beinhaltet, die sich auf unterschiedliche Bereiche der Sicherheit im Straßenverkehr beziehen. Speziell INTERSAFE beschäftigt sich mit den Gefahren an Kreuzungen. Dabei wird das Ziel verfolgt, den Fahrer mit Hilfe einer Funkverbindung in die Signalisierung einzubinden. Somit erhält der Fahrzeugführer Entscheidungshilfen, die ihm aufzeigen, ob eine sichere Überquerung der Kreuzung möglich ist oder die Geschwindigkeit verringert werden sollte. Das System greift nicht aktiv in das Geschehen ein, der Fahrer wird jedoch optisch und akustisch vor Gefahren gewarnt. Nach Abschluss von Intersafe 1 startete im Juni 2008 das Intersafe 2 Projekt.

## TRAVOLUTION

Lichtsignalanlagen stellen für das Verkehrsmanagement in städtischen Verkehrsnetzen das wichtigste Steuerungsinstrument dar. Im Jahr 2006 startete das Projekt TRAVOLUTION, ein Gemeinschaftsprojekt der GEVAS Software, der Stadt Ingolstadt, der AUDI AG und der TU München. Innerhalb des Projektes TRAVOLUTION wurde das Ziel verfolgt mittels zweier Ansätze den Verkehrsfluss zu verbessern. Einerseits durch Online-Optimierung der netzweiten Lichtsignalsteuerung mit evolutionären Algorithmen und andererseits durch eine LSA-Fahrzeug-Kommunikation zur individuellen Information des Fahrers. Für den ersten Ansatz wurde die Lichtsignalsteuerung in weiten Teilen des Hauptstraßennetzes der Stadt Ingolstadt auf die adaptive Netzsteuerung umgestellt. [AUD09]

## KOLINE

Im Juni 2009 startete das KOLINE-Projekt. Grundlage des KOLINE-Systems ist eine Lichtsignalsteuerung, welche durch die Nutzung aktueller infrastrukturseitiger Messdaten an die Verkehrssituation angepasst wird. Die so ermittelten Daten, insbesondere die Informationen über die Rot- und Grünphase der Signalgeber sowie zum geschätzten Rückstau in einer Zufahrt, werden von der Lichtsignalanlage mittels WLAN-Kommunikation versendet. Sobald ein mit der C2I-Kommunikationseinrichtung ausgestattetes Fahrzeug in den Sendebereich der Lichtsignalanlage einfährt, erhält es diese Informationen.



**Abbildung 2-6:** Datenaustausch im KOLINE-System und Funktionsweise (vgl. [KOL10])

Die empfangenen Informationen werden zusammen mit Sensordaten des Fahrzeuges und dessen Umfeld in einem Assistenzsystem verarbeitet. Daraus kann eine optimale Anfahrstrategie berechnet und automatisiert umgesetzt werden. Somit kann das Fahrzeug die Kreuzung komfort- und verbrauchsoptimiert passieren.

Gleichzeitig übermitteln die Fahrzeuge Zustandsdaten (z.B. Position, Geschwindigkeit) an die Lichtsignalanlage, welche der Lichtsignalsteuerung als „virtuelle Detektoren“ dienen. Durch Fusion dieser Informationen mit den infrastrukturseitigen Messeinrichtungen steigt das Optimierungspotential der Steuerung und die Abstimmung der Lichtsignalsteuerung auf den tatsächlichen Verkehrsfluss wird verbessert. [KOL10]

### 2.3.2 FAHRERASSISTENZSYSTEME ZUR REDUKTION DER FAHRZEUGEMISSIONEN

[WIN09] erklärt, Fahrerassistenzsysteme entfalten quasi als Nebenwirkung eine positive Wirkung auf die Umweltbilanz. Die Adaptive Geschwindigkeitsregelung (ACC) z.B. führt zu einer Abnahme der Beschleunigungs- und Verzögerungsspitzenwerte. Durch das ACC kann der Motor in günstigeren Betriebspunkten und somit effizienter zur Beschleunigung genutzt

werden. Die Verzögerung des Fahrzeuges kann durch eine frühzeitige Geschwindigkeitsanpassung ebenfalls optimaler als bei manueller Längsregelung erfolgen. Der Kraftstoffverbrauch kann mit dem Einsatz diverser FAS somit bedeutend geringer ausfallen.

Auf Basis der Einflussgrößen Fahrer, Fahrzeug und Verkehr (**Kapitel 2.1**) ergeben sich laut [NEU03] folgende technische Maßnahmengruppen, welche zur Konzeption eines Assistenzsystems für eine verbrauchsgünstige Fahrweise dienen:

- Optimierung des Antriebssystems  
(z.B. innermotorische Prozesse und Antriebskonzepte)
- Minimierung des Energiebedarfs eines Fahrzeuges  
(z.B. Leichtbau, Verringerung des Energiebedarfs der Verbraucher)
- Optimierung der Fahrweise und des Fahrzeugbetriebes  
(z.B. Einfluss der vorausschauenden und ruhigen Fahrweise)
- Verbesserung des Verkehrsablaufes  
(z.B. durch Verkehrsbeeinflussung und Verkehrsmanagement)

Es besteht weiterhin ein hoher Bedarf an Weiterentwicklungen im Bereich der FAS zur Steigerung einer effizienten und verbrauchsoptimalen Fahrweise. Ansätze hierfür liefern u.a. [DOR04] und [NEU03]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden diese aufgegriffen und *Optimierungsmaßnahmen der Fahrweise und des Fahrbetriebs* (M3) betrachtet. Speziell wird dabei eine Reduzierung der Haltezahl und Haltezeit des Fahrzeugs angestrebt sowie einer Verbrauchsverbesserung erzielt.

## 2.4 BERECHNUNG DES KRAFTSTOFFVERBRAUCHES

Während der Bewegung des Fahrzeuges in der Längsrichtung müssen Widerstände überwunden werden, welche den größten Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch ausüben.

Der Gesamtfahrwiderstand  $F_W$  setzt sich aus dem Rollwiderstand  $F_R$ , dem Luftwiderstand  $F_L$ , dem Steigungswiderstand  $F_{St}$  und dem Beschleunigungswiderstand  $F_a$  zusammen und wird wie folgt berechnet:

$$F_W = F_R + F_{LW} + F_{St} + F_a. \quad (2.1)$$

Der Rollwiderstand  $F_R$  entsteht durch Formänderungsarbeit zwischen Reifen und Fahrbahn

$$F_R = f_r \cdot (m_{Fzg} + m_{Zu}) \cdot g \quad (2.2)$$

Er setzt sich aus dem Rollwiderstandsbeiwert  $f$ , der Fahrzeugmasse  $m_{Fzg}$  und der Erdbeschleunigung  $g$  zusammen.

Der Steigungswiderstand  $F_{St}$  tritt wird beim Befahren einer Steigung ( $\alpha > 0$ ) positiv, für Gefälle ( $\alpha < 0$ ) hingegen negativ.

$$F_{St} = (m_{Fzg} + m_{Zu}) \cdot g \cdot \sin(\alpha_{St}) \quad (2.3)$$

Der Luftwiderstand  $F_L$  steigt quadratisch mit der Fahrgeschwindigkeit  $v_f$  und ist abhängig von der Beschaffenheit des Fahrzeuges (Luftwiderstandsbeiwert  $c_W$ , Querspanfläche  $A$ ) und den Eigenschaften der Luft ( $\rho_L$ ,  $v_W$ ).

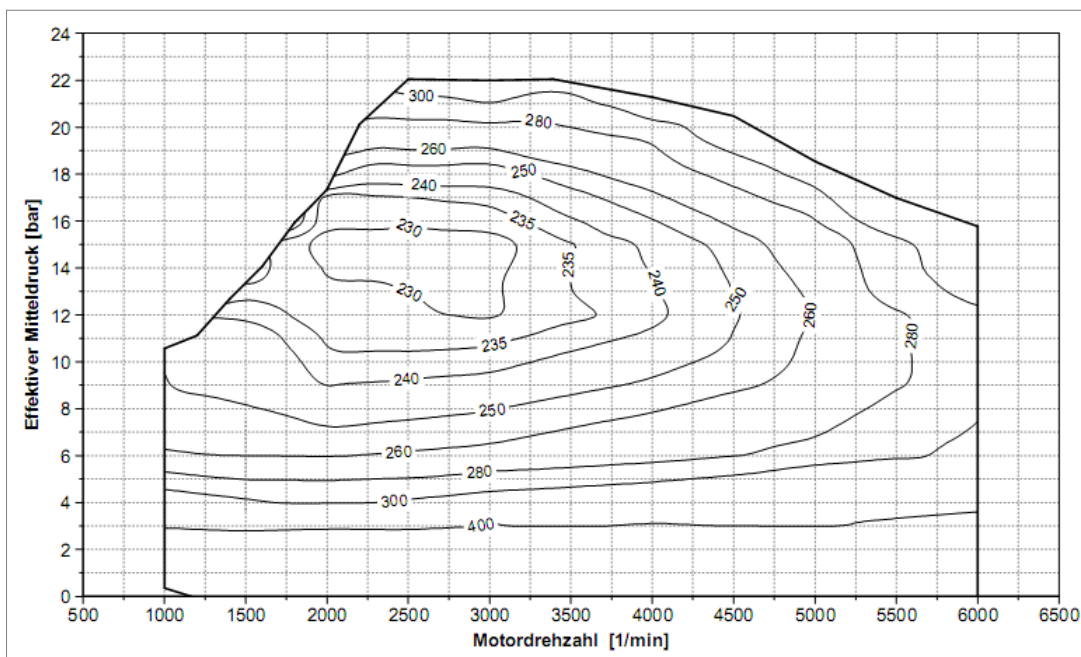
$$F_L = \frac{\rho_L}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot (v_f - v_{wind})^2 \quad (2.4)$$

Der Beschleunigungswiderstand  $F_a$  ist das Produkt aus Masse  $m$  und Beschleunigung  $a$ .

$$F_a = m \cdot a \quad (2.5)$$

### Verbrauchskennfeld

Auf Grundlage des Gesamtfahrwiderstandes ist es möglich den Streckenverbrauch zu bestimmen. Der Kraftstoffverbrauch eines Verbrennungsmotors lässt sich im stationären Betrieb in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment angeben. Stationär heißt, dass Motordrehzahl und Motorlast über längere Zeit konstant sind, sowie die Temperatur der Bauteile, des Kühlwassers und des Öls sich im Gleichgewicht befinden. Ein typisches Verbrauchskennfeld ist in **Abbildung 2-7** dargestellt. Darin ist der spezifische Kraftstoffverbrauch  $b_e$  in  $g/kWh$  angegeben. Der Punkt des minimalen Kraftstoffverbrauches  $b_{e,min}$  ist knapp unterhalb der Volllastkennlinie bei hoher Last und niedriger Drehzahl. Die genaue Lage ist hierbei motorspezifisch. [NAU07]



**Abbildung 2-7:** Beispiel eines Verbrauchskennfeldes eines Ottomotors mit Direkteinspritzung (IZEL06)

Aus dem Motorkennfeld mit den Muschelkennlinien kann der momentane spezifische Kraftstoffverbrauch abgelesen werden. Dazu werden die Motordrehzahl und das momentane Motordrehmoment  $M$  benötigt. Häufig ist anstatt des Motordrehmoments der effektive Mitteldruck  $p_{me}$  aufgetragen. Es gilt der Zusammenhang:

$$p_{me} = \frac{M 2\pi}{V_H i} \quad \text{mit } i = \frac{2}{\text{Taktzahl}} . \quad (2.6)$$

Die Drehzahl  $n_M$  berechnet sich aus der Fahrgeschwindigkeit  $v$  der Getriebeübersetzung  $i_A$  und dem dynamischen Radhalbmesser  $r_{dyn}$  wie folgt:

$$n_M = \frac{v_f i_A}{2 \pi r_{dyn}} \quad \text{mit } v_f = \omega_R r_{dyn} . \quad (2.7)$$

Aus dem spezifischen Kraftstoffverbrauch  $b_e$ , der aufzubringenden Leistung des Verbrennungsmotors  $P$ , der Fahrgeschwindigkeit  $v_f$  und der Dichte des Kraftstoffes  $\rho_K$  ergibt sich für den Streckenkraftstoffverbrauch:

$$b_s = \frac{b_e P}{v_f \rho_K} . \quad (2.8)$$

Damit lässt sich der Kraftstoffverbrauch über den zurückgelegten Weg ermitteln.

## 2.5 POSITIONSBESTIMMUNG IM STRASSENVERKEHR

Basis ortsabhängiger Fahrerassistenzsysteme ist eine Positionsbestimmung im Straßenverkehr. Wichtig für die Arbeit ist die relative Entfernungsbestimmung des Fahrzeugstandortes zu einer bekannten Position. In [HAN09] werden zehn mögliche Messverfahren vorgestellt, welche sich für diesen Zweck eignen. Nach einer groben Vorauswahl bezüglich Kostenaufwand und Komplexität der Umsetzung und einer anschließenden Anforderungsanalyse der übrigen sieben Verfahren, stellte sich die Satellitennavigation mittels eines sogenannten GNSS (Globales Navigations-Satelliten-System) als geeignete Variante heraus.

Es existieren insgesamt drei GNSS auf dem Globus.

- USA – NAVSTAR-GPS (Navigation System with Time and Ranging)
- Russland – GLONASS (Globales Navigations-Satelliten-System)
- Europa – Galileo-System

Der Aufbau und die zugrunde gelegten Messprinzipien von GPS, GLONASS und Galileo sind sehr ähnlich, darum wird im Folgenden vorrangig Bezug auf das GPS genommen.

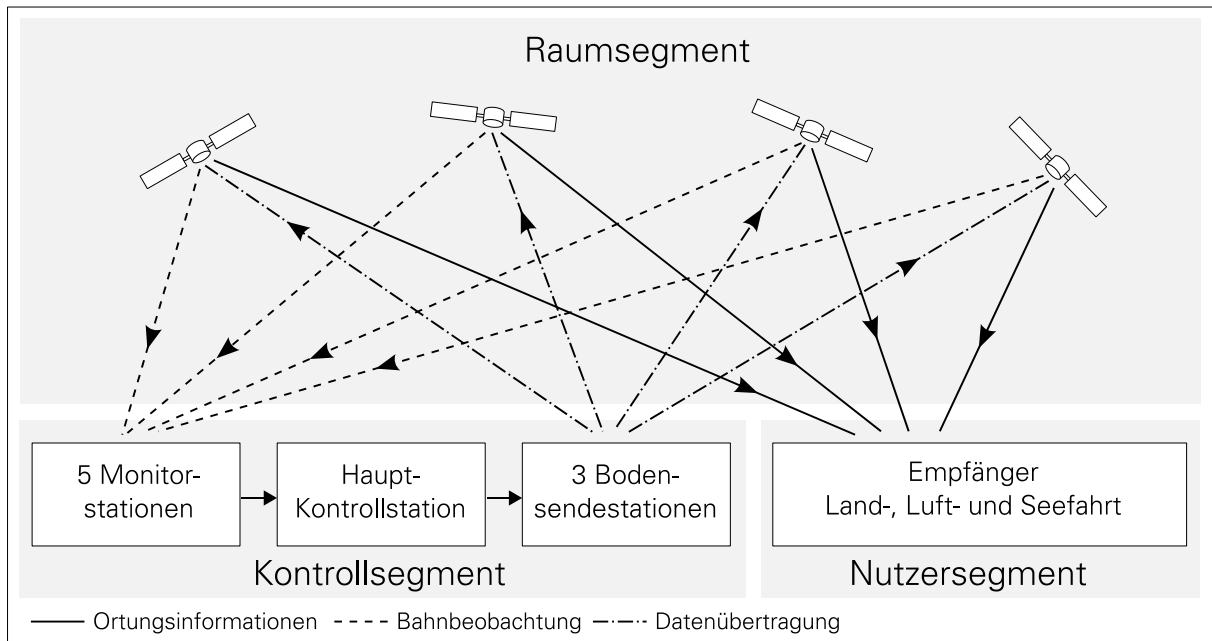
### 2.5.1 AUFBAU EINES SATELLITENNAVIGATIONSSYSTEMS

Nach [JOE08] wird für den Betrieb und die Nutzung eines GNSS nach Raumsegment, Kontrollsegment und Nutzersegment unterschieden (**Abbildung 2-8**).

**Raumsegment:** Bei GPS umkreisen nominell 24 Navigationssatelliten auf geeigneten Bahnen, in circa 20.000 Kilometer Höhe etwa zweimal täglich die Erde. Diese 6 Bahnen sind um 55° gegen die Äquatorebene geneigt, um eine weltweite, gleichmäßige Satellitenüberdeckung zu erhalten. Die Positionen jedes einzelnen Satelliten sind zu jedem Zeitpunkt

bekannt. Zudem strahlen diese permanent Signale ab um gleichzeitig beliebig vielen Nutzern eine Navigation zu ermöglichen.

**Kontrollsegment:** Bodenstationen (Trackingstationen oder Monitorstationen) mit bekannter Position beobachten permanent alle im jeweiligen Einzugsbereich sichtbaren Satelliten. Zudem ist es nötig die Bahnparameter (Ephemeriden) der Satelliten zu bestimmen um deren tatsächliche Position zu ermitteln. Weiterhin erfolgt eine Bahnvorhersage, welche an die Satelliten übermittelt und den Nutzern (Empfängern) später zur schnelleren Positionsermittlung zur Verfügung steht.



**Abbildung 2-8:** Segmente von GPS (vgl. [MAN04] S. 111)

**Nutzersegment:** Alle Satellitenempfänger einschließlich Hardware und Software, die meist auf oder nahe der Erdoberfläche eingesetzt werden, bilden das Nutzersegment. Zur Positionierung werten die Empfänger die von den Satelliten übertragenen Signale aus und berechnen daraus eine Position. Obwohl es sich um Satelliten-Navigationssysteme handelt, werden viele Empfänger nur zur Positionierung eingesetzt.

## 2.5.2 ABLAUF EINER POSITIONSBESTIMMUNG

Um den Fahrzeugstandort möglichst genau zu bestimmen, wird dieser im Navigationssystem stufenweise ermittelt. Der erste Schritt ist die Satellitenpeilung. Ausgestattet mit einer Atomuhr senden die Satelliten permanent ein Signal mit „Zeitstempel“ zur Erde. Dieses Signal wird mittels eines GPS-Empfängers analysiert. Aus der Zeitdifferenz zwischen Angaben der Atomuhr und der Uhr im System wird die Signallaufzeit und infolgedessen die Distanz zum Satelliten ermittelt. Mit Hilfe von mindestens drei Satelliten lässt sich somit die geografische Lage des Fahrzeuges feststellen.



### 2.5.3 FEHLERQUELLEN UND URSACHEN BEI DER POSITIONSBESTIMMUNG

Bei der Positionsbestimmung mit einem GPS System ist darauf zu achten, dass die Genauigkeit gewissen Schwankungen unterliegt, die auf verschiedene Fehlerquellen zurückzuführen sind. Einen Überblick über mögliche Fehler liefert **Tabelle 2-1**.

**Tabelle 2-1:** Systemfehler des GPS ([MAN04])

Fehlergruppe	Fehlerart	Beschreibung
Satelliten	Bahnfehler	Abweichung von der Umlaufbahn durch Gravitationskräfte verursacht durch Mond und Sonne
	Uhrenfehler	Ungenauigkeit der internen Uhr
Signalausbreitung	Atmosphäre	Fehler durch unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten im Weltraum und der Atmosphäre
	Mehrwegausbreitung	Fehler durch Reflexion an Objekten
Empfänger	Satellitengeometrie	Anordnung und Anzahl der verfügbaren Satelliten
	Temperatureffekte	Lufttemperatur hat Einfluss auf Ausbreitung der Funkwellen

Heutige GPS-Empfänger für die zivile Nutzung erreichen mitunter Genauigkeiten von wenigen Metern. Stark ins Gewicht fallen hierbei jedoch die Anzahl der verfügbaren Satelliten und deren Geometrie bezüglich des Empfängers. [KOW10]

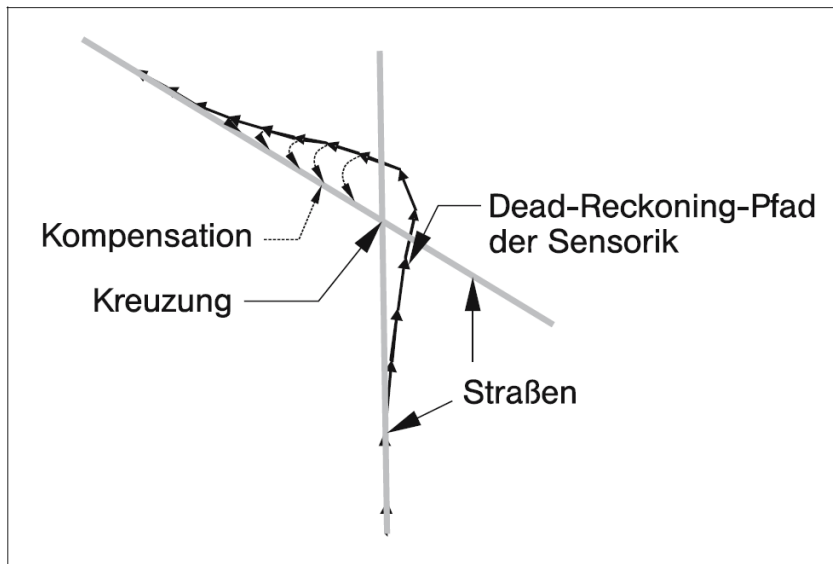
### 2.5.4 GENAUIGKEIT DER POSITIONSBESTIMMUNG

Die Genauigkeit des GPS beträgt zehn Meter in 90 Prozent der Messungen. Eine weitere Verfeinerung der Messergebnisse ermöglicht das Differential-GPS (D-GPS). Dabei wird ein stationärer GPS-Empfänger mit bekannter Position als Referenz genutzt. Dieser bestimmt ebenfalls mittels GPS ständig seine Position. Aus der ermittelten und der bekannten Position wird nun ein Korrekturfaktor berechnet, welcher an Navigationssysteme übermittelt wird. Es werden Genauigkeitssteigerungen bis etwa fünf Meter erreicht.

Ein noch präziseres und schnelleres Verfahren stellt das Assisted-GPS (A-GPS) dar. Diese Technik basiert auf dem Datenaustausch zwischen einem Telefonchip, einer Mobilfunkzelle und des GPS-Empfängers. Aufgrund der Teilung des Mobilfunknetzes in einzelne Zellen, kann man den unmittelbaren Standort des Teilnehmers bereits grob ermitteln. Dadurch vereinfacht und beschleunigt sich die Positionsbestimmung enorm. Einen weiteren Vorteil bietet der geringe Datentransfer zwischen Satellit und GPS-Empfänger, was zu verminderter Energieaufnahme führt.

Für die Navigation im Automobil ist es nicht ausreichend nur eine Satellitenpeilung zu nutzen. Grund dafür ist beispielsweise die Unerreichbarkeit in Tiefgaragen und Tunneln oder Reflexionen und Streuungen in dicht bebauten Gegenden. Abhilfe schafft hierbei die sogenannte Inertialnavigation. Die dafür notwendigen Daten liefern zusätzliche Sensoren im Fahrzeug, die jede Winkeländerung erfassen und Informationen über die Strecke und Geschwindigkeit bereitstellen. Aus diesen Informationen werden Vektoren berechnet, welche die

zurückgelegte Distanz und die Bewegungsrichtung pro Zeiteinheit umfassen. Durch Aneinanderreihung dieser Vektoren wird der zurückgelegte Weg dargestellt, diese Verknüpfung von Daten wird „Dead Reckoning“ (**Abbildung 2-9**) genannt. Die Daten sind sehr präzise, jedoch summieren sich die Toleranzen nach großen Zeiträumen zu stark, sodass eine alleinige Navigation mit Hilfe dieser nicht möglich ist. Darum werden die per Dead Reckoning errechneten Daten mit den GPS Daten kalibriert.



**Abbildung 2-9:** Abgleich der Dead-Reckoning Informationen mit dem GPS ([WAL06] S. 465)

Im nächsten Schritt werden diese Daten nach Möglichkeit mit einer digitalen Navigationskarte abgeglichen. Das sogenannte Map-Matching berücksichtigt auch die Vorgeschichte der ermittelten Werte sowie Messfehler und berechnet daraus die endgültige Fahrzeugposition. [WAL06]

### 2.5.5 VERARBEITUNG DER POSITIONSDATEN

Der Datenaustausch mit dem GPS-Empfänger erfolgt auf Basis des sogenannten NMEA-Datenprotokolls. Dieses Protokoll ist ein von der National Marine Electronics Association (NMEA) vorgeschriebener Standard. Die Daten werden als eine Verkettung von ASCII-Zeichen versandt. Jeder Datensatz beginnt mit einem „\$“-Zeichen gefolgt von zwei Zeichen für die Sendererkennung, z.B. „GP“ für GPS. Anschließend folgen drei Zeichen für die Satznummer. Die folgenden Daten sind durch Kommas voneinander getrennt. Falls eine durch den Datensatz vorgesehene Information nicht zur Verfügung steht, so bleibt dieser Platz leer, das Komma wird jedoch beibehalten, um die Weiterverarbeitung zu ermöglichen. Jeder Datensatz endet mit einer hexadezimalen Prüfsumme, die durch ein „\*“ eingeleitet wird.

Am Beispiel des \$GPRMC-Datensatzes (RMS - Recommended Minimum Sentence – Empfohlener Minimumdatensatz) wird in **Tabelle 2-2** der Aufbau eines Datensatzes erläutert. Mittels eines einfachen Algorithmus ist es möglich den empfangenen Datenstrom auszuwerten und die relevanten Informationen herauszufiltern.

**Tabelle 2-2:** Definition des GPRMC-Datensatzes NMEA Protokoll

\$GPRMC,172929,A,5054.2983,N,00801.7658,E,000.0,000.0,090903,000.2,W*62	
\$	Datensatzbeginn
GP	Global Positioning System Sender
RMC	empfohlener Minimumdatensatz (Recommended Minimum Sentence C)
172929	17:29:29 UTC Zeit (Universal Time Coordinated) oder Zeit auf Greenwich-Meridian in England
A	Empfängerstatus (A-Daten, V-Empfänger Warnung)
5054.2983	50°54,2983' Breitengrad
N	Nord
00801.7658	8°01,7658' Längengrad
E	Ost (East)
000.0	Geschwindigkeit in Knoten
0.000	Kurs in ° (ohne Bewegung ist 0°)
090903	09.09.2003 Datum
0.002	magnetische Deklination in °
W	West, Himmelsrichtung für magnetische Deklination
*	Beginn Prüfsumme
62	Prüfsumme als hexadezimale Zahl

## 2.6 LICHTSIGNALANLAGEN (LSA)

Lichtsignalanlagen (LSA), im Volksmund auch „Ampel“ genannt, werden zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und zur Verbesserung des Verkehrsflusses eingesetzt. Die Lichtsignalsteuerung bestimmt in hohem Maße die Verkehrsabwicklung an Knotenpunkten. Sie ist damit ein wichtiger Bestandteil des Verkehrsmanagements.

Alle Maßnahmen, die den Verkehrsfluss auf einem gleichmäßigen Geschwindigkeitsniveau im Bereich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit halten, tragen grundsätzlich zu einer Verringerung des Kraftstoffverbrauchs bei. Primäre Zielsetzungen bei der Entwicklung von Signalprogrammen sind:

- Verringerung der Haltezahl und der Haltezeit
- gleichmäßige Fahrt über mehrere Knotenpunkte
- Beeinflussung der Wegewahl der Verkehrsteilnehmer

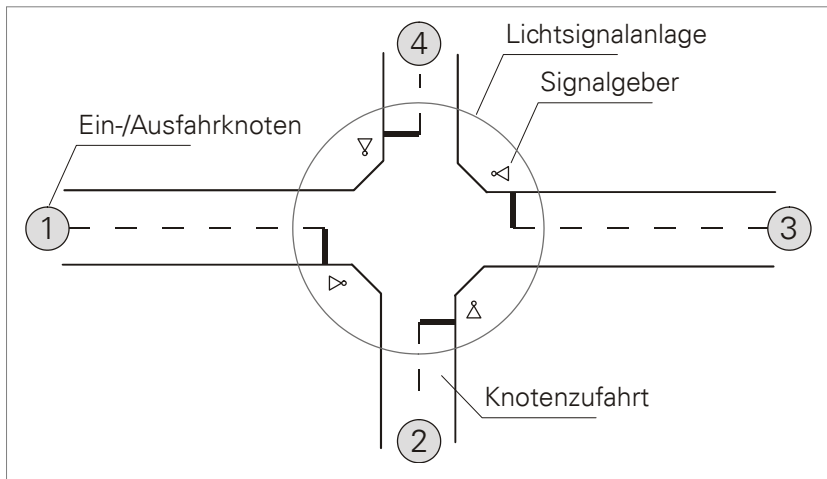
Um diese Ziele zu erreichen ist es wichtig an die Schwankungen des Verkehrsablaufes angepasste Signalprogramme zu entwickeln.

## 2.6.1 DEFINITION WICHTIGER BEGRIFFE

Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Erläuterungen werden in **Tabelle 2-3** zunächst einige Begriffe vorgestellt. Diese können anhand des in **Abbildung 2-10** gezeigten Kreuzungsbereich nachvollzogen werden.

**Tabelle 2-3:** Begriffe der Verkehrstechnik ([RIC05] S. 4ff)

Begriff	Beschreibung
Signalgeber	Ein Signalgeber ist ein Lichtzeichen, das zur Regelung des Verkehrs am Ende einer Zufahrt an einem Knotenpunkt verwendet wird. Ein Signalgeber kann die Lichtsignale Rot, Rot-Gelb, Gelb und Grün zeigen.
Freigabezeit	Die Zeitspanne, in der ein Signalgeber Grün zeigt, wird als Grünzeit $t_g$ bezeichnet, in dieser Zeit erfolgt die Freigabe der jeweiligen Fahrtrichtung und die Fahrzeuge dürfen die Haltelinie passieren.
Sperrzeit	Die Zeitspanne, in der ein Signalgeber Rot zeigt, wird als Rotzeit $t_R$ bezeichnet. Während dieser Zeit ist die entsprechende Fahrtrichtung gesperrt. Fahrzeuge dürfen die Haltelinie nicht überqueren.
Übergangszeit	Die Zeitspanne, in der ein Signalgeber Gelb-Rot oder Gelb anzeigt, wird als Übergangszeit bezeichnet
Lichtsignalanlage	Eine Lichtsignalanlage (LSA) ist eine technische Einrichtung, welche mittels Signalgebern den Verkehr an Kreuzungen, Einmündungen und Ähnlichem regelt.
Signalphase	Als Signalphase wird die Zeitspanne an einer LSA bezeichnet, in der sich der Zustand ihrer Signalisierung nicht ändert; d.h. alle Signalgeber behalten für die Dauer einer Phase ihren Signalisierungszustand bei.
Signalprogramm	Das Signalprogramm setzt sich aus einer Abfolge von Phasen zusammen, die sich periodisch wiederholt. Es enthält somit die Information darüber, wann an welchem Signalgeber welches Lichtsignal angezeigt wird.
Umlaufzeit	Die Ablaufdauer des Signalprogramms wird als Umlaufzeit $t_U$ bezeichnet.
Versatzzeit	Die Verschiebung des Startzeitpunktes des Signalprogrammes einer Lichtsignalanlage gegenüber einem von außen vorgegebenen Synchronisationszeitpunkt $t_0$ wird als Versatzzeit bezeichnet. Dieser Zeitpunkt könnte z.B. der Startzeitpunkt des Signalprogrammes der benachbarten LSA sein.
Festzeitsteuerung	Wird das Signalprogramm einer LSA über einige Stunden hinweg nicht verändert, spricht man von einer Festzeitsteuerung.
Ein-/Ausfahrknoten	Die Stellen, über die Fahrzeuge in ein Straßennetzwerk ein- oder ausfahren, werden als Ein- bzw. Ausfahrknoten bezeichnet.

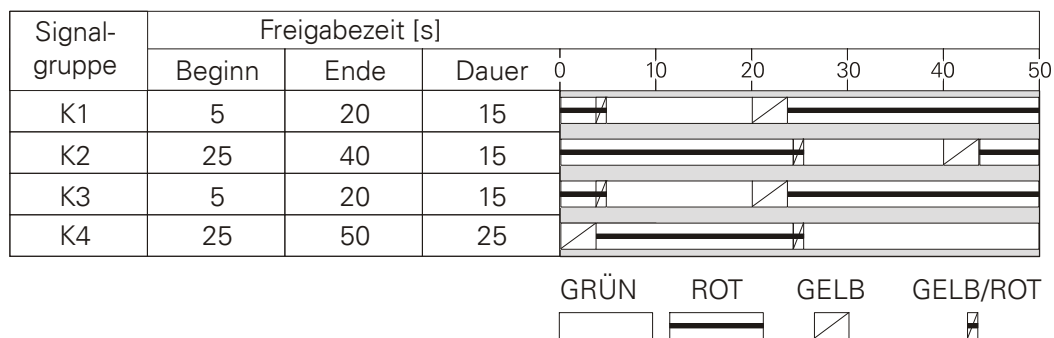


**Abbildung 2-10:** Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage

In **Abbildung 2-10** ist ein Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage dargestellt. Zu diesem Knotenpunkt führen vier einspurige Knotenzufahrten mit jeweils einem Signalgeber (K1 bis K4).

**Beispiel eines Signalzeitenplan**

Der Signalzeitenplan stellt die Phasen einer LSA in übersichtlicher Form dar. Er dient der besseren Übersicht bei der Planung einer LSA. Ein einfacher Signalzeitenplan der Beispielkreuzung ist in **Abbildung 2-11** dargestellt.



**Abbildung 2-11:** Beispiel des Signalzeitenplan für den in **Abbildung 2-10** dargestellten Knotenpunkt

Links sind die einzelnen Signalgruppen und die Freigabezeiten aufgelistet. In der Tabelle werden für die Signalgebergruppen der Beginn der Freigabezeiten sowie deren Ende und Dauer definiert. Im Zeitenplan (rechts) werden alle Signalzeiten (GRÜN und ROT) und die Übergangszeit (GELB und GELB/ROT) abgebildet. Der Ablauf dieses Zeitenplanes von links nach rechts stellt einen kompletten Umlauf dar und entspricht damit der Umlaufzeit.

**2.6.2 ÜBERBLICK ÜBER STEUERUNGSVERFAHREN**

Steuerungsverfahren beschreiben den Ablauf eines Signalprogramms. Sie definieren die Art, den Umfang und das Zusammenwirken von veränderbaren Steuerungsgrößen und Signalprogrammelementen.

Eine Übersicht über aktuelle Verfahren der makroskopischen und mikroskopischen Steuerungsebene zeigt **Tabelle 2-4**.

Verfahren der makroskopischen Steuerungsebene berücksichtigen langfristige Belastungsänderungen in Verkehrsnetzen, Teilnetzen oder an Einzelknotenpunkten. Dabei reagieren sie auf makroskopische Kenngrößen, wie beispielsweise

- die mittlere Staulänge,
- die mittlere Verkehrsdichte und
- Emissionsgrenzwerte

Die dabei ausgewählten zeitplanabhängigen (A1) oder verkehrsabhängigen (A2) Signalprogramme beziehungsweise der verkehrsabhängig gebildete Rahmensignalplan (A3) bleiben für längere Zeit geschaltet.

Üblicherweise bilden die Verfahren der makroskopischen Ebene den Rahmen für die mikroskopische Steuerungsebene. Deren Verfahren reagieren auf kurzfristige Änderungen des jeweiligen Verkehrszustandes am Einzelknotenpunkt mit Ausnahme des Festzeitsignalprogrammes.

**Tabelle 2-4:** Übersicht über Steuerungsverfahren ([FGS10] S. 37)

	Steuerungsverfahren		Ordnungszahl	Aktivierung		verkehrsabhängig veränderbare Elemente der Signalprogramme				
	Oberbegriff	Hauptmerkmal der Veränderbarkeit der Signalprogramme		zeitplanabhängig	verkehrsabhängig	Umlaufzeit	Phasenfolge	Phasenzahl	Freigabezeiten	Versatzzeit
<b>A: Makroskopische Steuerungsebene</b>	Signalprogramm-auswahl	zeitplanabhängige Auswahl der Signalprogramme	A1	X		In Kombination mit einem Steuerungsverfahren der Gruppe B veränderbare Elemente des Signalprogramms				
		verkehrsabhängige Auswahl der Signalprogramme	A2		X					
	Bildung Rahmensignalprogramm	verkehrsabhängige Bildung der Rahmensignalprogramme	A3		X					
<b>B: Mikroskopische Steuerungsebene</b>	Festzeitsignalprogramm	festes Signalprogramm	B1	Aktivierung gemäß Steuerungsverfahren der Gruppe A						
	Signalprogramm-anpassung	Freigabezeit-anpassung	B2					X		
		Phasentausch	B3			X				
		Phasen-anforderung	B4				X	X		
		Versatzzeit-anpassung	B5						X	
	Signalprogramm-bildung	freie Veränderbarkeit	B6		X	X	X	X	X	

Weitergehende Informationen zu den Steuerungsverfahren und deren Umsetzung, sowie einige Beispiele liefert die RiLSA 2010 ([FGS10]).

Soll das gegenwärtige Signalprogramm geändert werden, so wird ein neues Signalprogramm definiert, in das gewechselt wird. Dazu ist eine definierte Umschaltung erforderlich. Nachfolgend wird die Umschaltung zwischen Signalprogrammen erläutert.

### 2.6.3 UMSCHALTUNG ZWISCHEN SIGNALPROGRAMMEN

Der Wechsel zwischen Signalprogrammen wird als Umschaltvorgang bezeichnet. Ein Umschaltvorgang von einem Signalprogramm in ein anderes erfordert die Definition eines geeigneten Umschaltverfahrens oder die Auswahl eines der folgenden Verfahren:

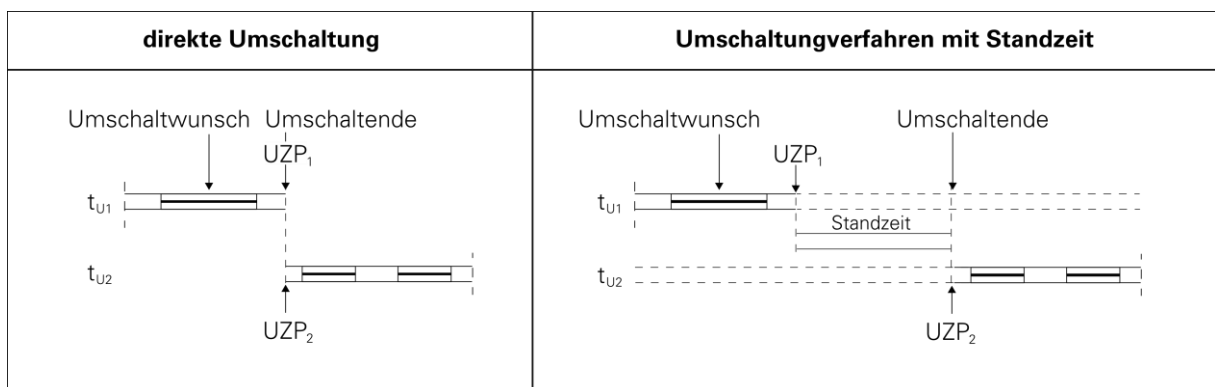
- Umschaltung zum Zeitpunkt
- Umschaltung nach dem Stauch-/Dehnverfahren
- Umschaltung ohne definierten Umschaltzeitpunkt

#### Umschaltung zum Zeitpunkt

Das einfachste Umschaltverfahren im Bereich von Einzelsteuerungen ist die Umschaltung zum Zeitpunkt. Die Umschaltzeitpunkte (UZP) können innerhalb oder außerhalb der Freigabezeit liegen. Sie dürfen jedoch nicht innerhalb der Übergangszeit erfolgen. **Abbildung 2-12** zeigt zwei Prinzipien.

Bei der **direkten Umschaltung** wird, nach dem Eintreffen des Umschaltwunsches, das gegenwärtig geschaltete Signalprogramm noch bis zum Umschaltzeitpunkt (UZP<sub>1</sub>) abgearbeitet. Bei Erreichen des UZP<sub>1</sub> erfolgt der Wechsel in das neue Signalprogramm. Das gegenwärtige Signalprogramm wird deaktiviert und das neue zum Zeitpunkt UZP<sub>2</sub> aktiviert.

Beim **Umschalten mit Standzeit** entsteht aufgrund unterschiedlicher Umlaufzeiten bzw. unterschiedlicher UZP der Signalprogramme eine Standzeit. Falls es für die Verkehrsteilnehmer in gesperrter Richtung zumutbar ist, sind dabei Standzeiten von maximal einer Umlaufzeit möglich. Sobald UZP<sub>2</sub> erreicht ist, erfolgt auch hier der Wechsel in das neue Signalprogramm.



**Abbildung 2-12:** Prinzip der direkten Umschaltung und der Umschaltung mit Standzeit (vgl. [FGS10] S. 49)

### Umschaltung nach dem Stauch-/Dehnverfahren

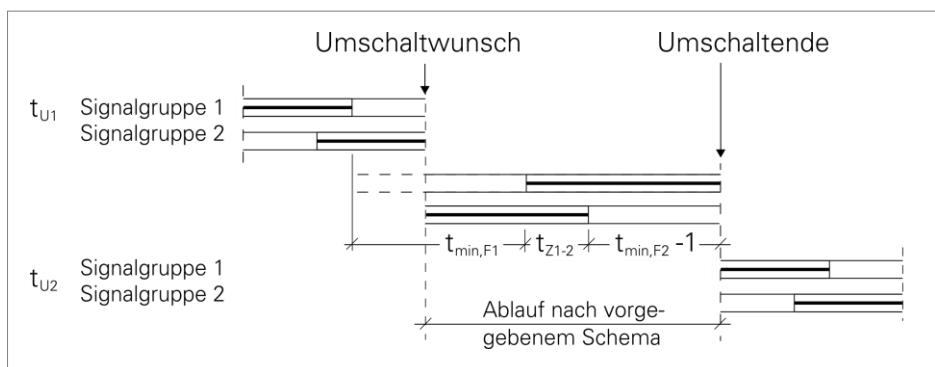
Bei diesem Verfahren wird geprüft, ob es einen Zeitpunkt gibt zu dem das gegenwärtige und das Signalprogramm in das gewechselt werden soll übereinstimmen. Ist dies der Fall, so erfolgt der Wechsel. Mittels Stauchung oder Dehnung der Phasen erfolgt eine Synchronisierung mit dem Referenzzeitregister.

### Umschaltung ohne definierten Umschaltzeitpunkt

Ist kein UZP definiert, wird beim Eintreffen eines Umschaltwunsches das gegenwärtige mit dem gewünschten Signalprogramm verglichen. Bei fehlender Übereinstimmung werden die betroffenen Signalgruppen unter Einhaltung

- der Mindestfreigabezeiten  $t_{F,min}$ ,
- der Zwischenzeiten  $t_Z$
- eventuell vorhandener Versatzbedingungen sowie
- maximaler Sperr- und Freigabezeiten

in den Signalisierungszustand des gewünschten Programms überführt. Die Aktivierung des gewünschten Signalprogramms erfolgt, sobald alle Signalgruppen den Soll-Zustand erreicht haben. Zur Veranschaulichung dient **Abbildung 2-13**. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens ist der Übergang aus dem aktuellen Signalisierungszustand in das gewünschte Signalprogramm innerhalb kürzester Zeit.



**Abbildung 2-13:** Prinzip der direkten Umschaltung ohne definierten Umschaltzeitpunkt (vgl. [FGS10] S. 49)

Damit hat der Entwickler die Wahl zwischen mehreren vielseitig einsetzbaren Umschaltverfahren. Die Auswahl eines geeigneten Verfahrens erfolgt kreuzungsabhängig. Es bietet sich jedoch jederzeit die Möglichkeit ein eigenes Umschaltverfahren zu definieren.

## 2.6.4 BEVORRECHTIGUNGSARTEN FÜR DEN ÖPNV

Mitte der 80er Jahre wurden die Anforderungen an Lichtsignalsteuerungen um den Aspekt der Bevorrechtigung von Fahrzeugen des Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) erweitert. Durch die Bevorrechtigung wird einerseits die Reisegeschwindigkeit verkürzt und damit die Attraktivität des ÖPNV bei den Fahrgästen gesteigert. Andererseits können betriebliche Kosteneinsparungen (Personal, Fahrzeuganzahl) durch verminderte Fahrzeiten und verkürzte Standzeiten erreicht werden.



Es wird zwischen **absoluter** und **bedingter Bevorrechtigung** unterschieden. Die absolute Bevorrechtigung ist die stärkste Form der Einflussnahme. Sie strebt freie Fahrt für den ÖPNV an allen Konfliktpunkten mit den übrigen Verkehrsarten an. Verkehrs- und Umfeldbedingungen sind dabei von untergeordneter Bedeutung. Die bedingte Bevorrechtigung hingegen umfasst alle Maßnahmen, die dem ÖPNV nur bei Einhaltung von bestimmten, verkehrlichen Randbedingungen freie Fahrt an Konfliktpunkten gewähren.

Die ÖPNV-Beeinflussungen lassen sich mit den Verfahren der mikroskopischen Steuerungsebene (siehe **Tabelle 2-4** Gruppe B) realisieren. Die Randbedingungen für den Umschaltvorgang bei der Anforderung einer Freigabe durch Fahrzeuge des ÖPNV sind **Kapitel 2.6.3** zu entnehmen. **Tabelle 2-5** zeigt ÖPNV-beeinflusste Steuerungsverfahren für Einzelknotenpunkte. Es ist noch zu bemerken, dass bei heutigen LSA überwiegend die Verfahren E4 und E5 zum Einsatz kommen und die Verfahren E1 bis E3 nur beim Einsatz älterer Gerätetechnik Verwendung finden.

**Tabelle 2-5:** ÖPNV-beeinflusste Steuerungsverfahren für Einzelknotenpunkte ([FGS93] S.10)

	<b>E 1</b>	<b>E 2</b>	<b>E 3</b>	<b>E 4</b>	<b>E 5</b>
<b>Charakteristik der Verfahren</b>	Anpassung der Freigabezeiten	Anpassung der Freigabezeiten und Veränderung der Phasenlage	Anpassung der Freigabezeiten und Einblendung von Freigabezeiten für den ÖPNV zu festen Zeitpunkten	Anpassung wie E 3, aber Einblendung von Freigabezeiten für den ÖPNV variabel innerhalb eines Umlaufes	Bildung der Programmelemente Freigabezeit Phasenzahl Phasenfolge Umlaufzeit
<b>Beeinflussung der Freigabezeiten für ÖPNV-Bedienung</b>	Verlängerung Verkürzung	Verlängerung Verkürzung Verschiebung der Phasenlage	Verlängerung Verkürzung Bereitstellung von ÖPNV-Freigabezeiten zu festen Zeitpunkten Unterdrückung und/oder Verkürzung bestimmter Phasen	Verlängerung Verkürzung wie E 3, aber Bereitstellung von ÖPNV-Freigabezeiten variabel innerhalb der Umlaufzeit	
<b>festes Signalprogrammelemente</b>	Phasenanzahl Phasenfolge	Phasenzahl			
<b>Nutzen für ÖPNV</b>	gering bis mittel	gering bis mittel	mittel bis stark	stark bis sehr stark	sehr stark

### **Anpassung der Freigabezeiten (E1)**

In der Regel erlauben festzeitgesteuerte LSA keine Bevorrechtigung des ÖPNV. Die Nachteile dieses Steuerungsverfahrens lassen sich allenfalls durch eine vorgegebene Erhöhung der Freigabezeitanteile in ÖV-Lastringung mindern. Etwa auch durch zweimalige Freigabe in einem Umlauf (Doppel-Anwurf).

Das einfachste Verfahren zur ÖPNV-Beeinflussung im Rahmen einer festen Umlaufzeit ist die Verlängerung oder Verkürzung der Freigabezeiten unter Beibehaltung der Reihenfolge der Phasen. Dieses Verfahren findet Anwendung, falls für die Konfliktströme zum ÖPNV infolge der Auslastung des Knotenpunktes keine großen Spielräume zur Verfügung stehen.

**Anpassung der Freigabezeiten und Veränderung der Phasenlage (E2)**

Falls es die Verkehrssituation erfordert, kann die Phasenlage für den ÖPNV und den parallel laufenden Individualverkehr (IV) verändert werden. Die Phasenanzahl bleibt dabei konstant. Es besteht die Möglichkeit Vorläufe und Nachläufe für die Freigabezeit in ÖPNV-Richtung einzurichten. Gegenüber E1 erfolgt die Anpassung jedoch über einen erhöhten Hard- und Softwareaufwand.

**Anpassung der Freigabezeiten, Veränderung der Phasenfolge sowie Einblendung von Freigabezeiten für den ÖPNV (E3)**

Neben der Verlängerung und Verkürzung von Freigabezeiten, besteht die Möglichkeit, unter Einhaltung der Umlaufzeit, Freigabezeiten zu festen Zeitpunkten im Schaltprogramm einzubinden. Dies kann einerseits durch Unterdrückung untergeordneter Phasen andererseits durch Verschieben und Verkürzen anderer Freigabezeiten erfolgen. Folglich bleibt die Phasenzahl konstant, es erfolgt lediglich eine temporäre Änderung des Inhalts der Phasen. Durch E3 kann eine deutliche Effektivitätssteigerung für die ÖPNV-Bevorrechtigung erfolgen. Geringe bis mittlere Auslastungsgrade für den IV begünstigen dieses Steuerverfahren.

**Anpassung der Freigabezeiten und Veränderung der Phasenfolge mit verkehrsabhängig anforderbaren Einblendungen (E4)**

Unter Berücksichtigung einer festen Umlaufzeit und der Auslastung der Knotenpunktzufahrten können Einblendungen bzw. Verlängerungen oder Verkürzungen der vorhandenen Freigabezeiten in ÖPNV-Lastrichtung erfolgen. Die Phasenanzahl ist variabel, damit können in Abhängigkeit der Verkehrssituationen einzelne Phasen verschoben, verkürzt und/oder unterdrückt werden. Bei höherer Auslastung wirken die festen Umlaufzeiten nachteilig auf die Realisierung großer Beschleunigungseffekte.

Zur Einhaltung zumutbarer Wartezeiten für den IV können Einschränkungen für ÖPNV-Anforderungen gewährt werden.

**Signalprogrammabbildung mit variabler Umlaufzeit (E5)**

Hierbei wird weder die Umlaufzeit und die Dauer der Freigabezeiten noch die Phasenanzahl und -folge festgelegt. Es existieren lediglich Mindestgrünzeiten und maximale Rotzeiten als Randbedingungen. Die Optimierung der Steuerung erfolgt nach vorzugebenden Zielgrößen. Folgende Vorteile dieses Verfahrens bei der ÖPNV-Bevorrechtigung sind zu nennen:

- hohe Anpassungsfähigkeit an wechselnde Verkehrszustände
- Umsetzbarkeit von ÖPNV-Anforderungen bei minimaler Reaktionszeit
- größerer Eingriffsspielraum für den ÖPNV bei geringstmöglichen Restriktionen für betroffene Verkehrsströme
- direkte Kompensationsmöglichkeiten für nachrangig bedingte Verkehrsströme

Somit stellt dieses Verfahren eine hohe Ausnutzung der Leistungsfähigkeit des Straßenraumes für alle Verkehrsteilnehmer dar und schafft zudem in größtem Umfang zusätzliche Freigabezeiten für den ÖPNV. Die Auswirkungen auf den MIV sind bei der Planung zu berücksichtigen, was mit hohem investivem Aufwand verbunden ist. [FGS93]

### 3 ANALYSE DES BESTEHENDEN SYSTEMS

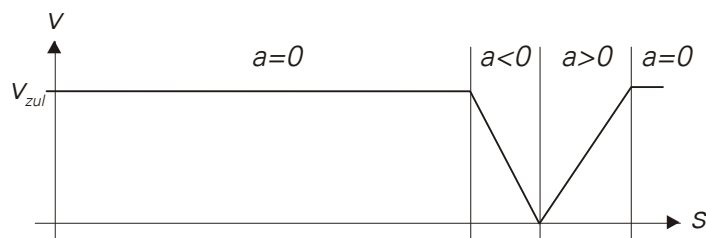
Am Institut für Automobiltechnik Dresden (IAD) wurde ein Prototyp für die Kommunikation einer Lichtsignalanlage mit einem Fahrzeug realisiert, um den Nutzen der Übermittlung von Restlaufzeiten (RLZ) an Verkehrsteilnehmer zu untersuchen. Den Grundlagen im vorhergehenden Kapitel schließt sich eine detaillierte Beschreibung des Aufbaues und der Funktionsweise der aktuellen Umsetzung des Fahrerassistenzsystems aus [HAN09] an. Aus dieser Untersuchung resultieren Verbesserungsansätze, welche in **Kapitel 4** aufgegriffen und entsprechend ausgearbeitet werden.

#### 3.1 FAHRPROFILE ZUR ANNÄHERUNG AN LSA

Ein typisches Fahrprofil bei der Annäherung an die Haltelinie vor einer LSA ist aus einer spezifischen Anzahl der folgenden vier Teilabschnitte aufgebaut:

- Fahren mit konstanter Geschwindigkeit ( $v = konst$ )
- Beschleunigen ( $a > 0$ )
- Verzögern ( $a < 0$ )
- Stillstand ( $v = 0$ )

In **Abbildung 3-1** ist der Verlauf eines typischen Fahrprofils bei der Annäherung an eine LSA in der Signalphase Rot dargestellt.



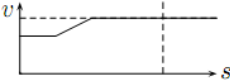
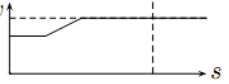
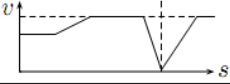
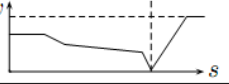
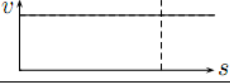
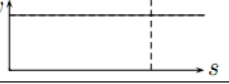
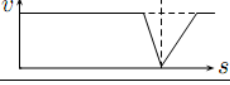
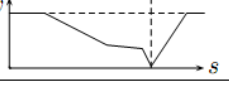
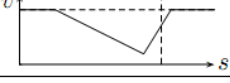
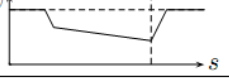
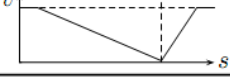
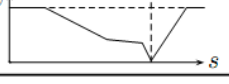
**Abbildung 3-1:** Aufbau eines Fahrprofils (Ausgangspunkt SG zeigt „Rot“) bei der Annäherung an eine LSA

Ein Fahrzeugstillstand muss dabei nicht zwingend auftreten und das Fahrzeug kann im Idealfall mit konstanter Geschwindigkeit ohne Beschleunigungs- oder Verzögerungsvorgänge die Haltelinie passieren.

#### 3.2 NUTZEN DES ASSISTENZSYSTEMS

Das Verhalten verschiedener Fahrzeugführer bei der Annäherung an einen Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage kann, aufbauend auf den Untersuchungen in [DOR04], nach sechs wesentlichen Fahrvarianten gegliedert werden. Der Zusammenhang zwischen Signalverlauf und Fahrverhalten ist in **Tabelle 3-1** dargestellt. Der Mehrwert des Einsatzes eines Assistenzsystems ist rechts dargestellt.

**Tabelle 3-1:** Wesentliche Fahrvarianten auf Grundlage optisch erfasster Lichtsignale (vgl. [DOR04] S. 69)

Situationsbeginn • Geschwindigk. • Lichtsignal	schematisches Geschwindig- keitsprofil (ohne Assistenz)	Beschreibung der • Assistenzempfehlung • LSA-Anlage	schematisches Geschwindig- keitsprofil (mit Assistenz)
$v_{Fzg} < v_{zul}$ Grün	1 	Einleitung Beschleunigung, LSA bleibt grün	
Grün	2 	Fahrstrategie mit Still- stand, LSA wird rot	
$v_{Fzg} \leq v_{zul}$ Grün bzw. Rot	3 	Fortsetzung Konstantfahrt, LSA bleibt/wird grün	
	4 	Fahrstrategie mit Still- stand, LSA bleibt/wird rot	
$v_{Fzg} \leq v_{zul}$ Rot	5 	Stillstandsvermeidungsstra- tegie, LSA wird grün	
	6 	Fahrstrategie mit Still- stand, LSA bleibt rot	

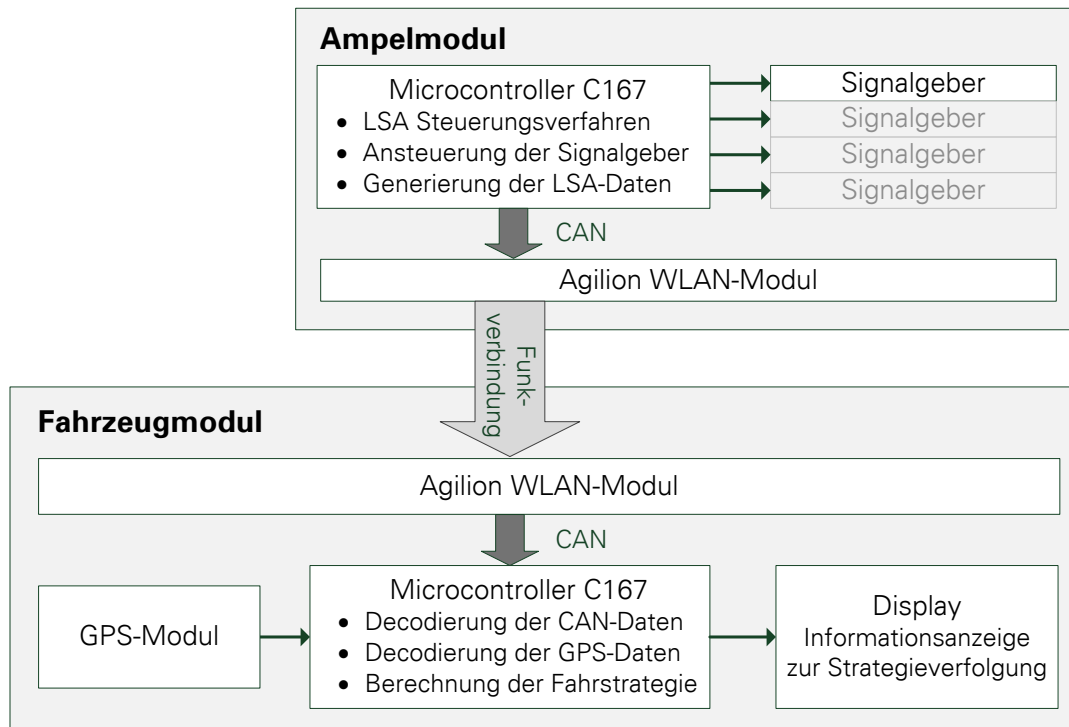
Durch die Kenntnis über die Restlaufzeiten der Signalgeber ist es insbesondere für die Situationen 2, 4 und 5 möglich wesentlich günstigeren Fahrprofile zu generieren. Die Verbesserungspotentiale dieses Systems können jedoch nicht praktisch nachgewiesen werden.

### 3.3 AUSGANGSLAGE DES BISHERIGEN FAHRERASSISTENZSYSTEMS

Es erfolgt eine Beschreibung des aktuellen Fahrerassistenzsystems, welches sich aus den Teilsystemen Ampelmodul, Fahrzeugmodul sowie der Kommunikationsschnittstelle zwischen beiden Systemen zusammensetzt. Der prinzipielle Aufbau ist in **Abbildung 3-4** dargestellt. Die Überlegungen aus [AUE08] und [HAN09] sind Ausgangspunkt zur Darlegung des aktuellen Systemaufbaus.

Das am IAD aufgebaute **Ampelmodul** besteht aus einem Steuergerät ( $\mu C$ ), an das ein Signalgeber angeschlossen ist. Es ist möglich bis zu drei weitere Signalgeber für die verschiedenen Knotenpunktzufahrten anzuschließen. Über die Kommunikationsschnittstelle (Agilion WLAN-Modul) werden die Daten der Lichtsignalanlage als CAN-Botschaften (siehe auch **Tabelle 3-2**) alle 100 Millisekunden übertragen.

Das **Fahrzeugmodul** besteht ebenfalls aus einem Mikrocontroller der C167-Familie an dem ein GPS-Empfänger und ein Agilion WLAN-Modul zum Empfang der relevanten LSA-Daten angeschlossen sind. Bei dem verwendeten **GPS-Modul** handelt es sich um den Typ NL-550ERS der Firma NAVILOCK mit einem U-BLOX5-Chipsatz. Dieses Modul unterstützt den Standard NMEA 0183. Nach der Auswertung der benötigten Informationen aus dem übermittelten Datenstrom (siehe **Kapitel 2.5.5**) erfolgt die Entfernungsbestimmung zur LSA. Zusammen mit den Daten des LSA-Moduls ermittelt das Steuergerät eine Strategie, welche dem Fahrer in geeigneter Form über ein Display dargestellt wird.

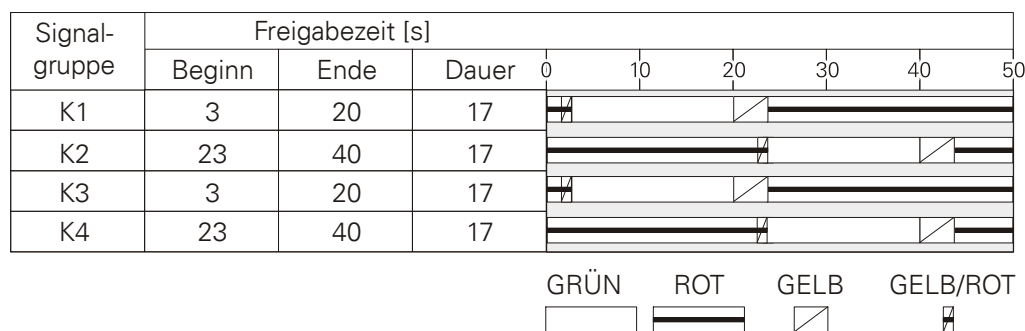


**Abbildung 3-2:** Prinzipieller Aufbau und Struktur des Fahrerassistenzsystems

Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und der Lichtsignalanlage erfolgt momentan über ein WLAN-Netzwerk, das zwischen zwei Wireless-CAN-Funkmodulen der AGILION GmbH aufgebaut wird. Dieses basiert auf dem Standard IEEE 802.15.4a. Die Reichweite auf dem Versuchsgelände ist aufgrund baulicher Gegebenheiten auf etwa 180 Meter begrenzt.

### 3.3.1 PHASENZYKLUS

Die LSA verwendet ein Festzeitsignalprogramm für die Steuerung der Signallaufzeiten. In **Abbildung 3-3** ist der Signalzeitenplan der implementierten Beispielkreuzung gezeigt. Darin sind die Signalphasen der einzelnen Signalgeber K1 bis K4 dargestellt.



**Abbildung 3-3:** Signalzeitenplan der Beispielkreuzung auf dem Versuchsgelände

Ein Phasenzzyklus der LSA setzt sich aus der Grünzeit  $t_G$ , der Rotzeit  $t_R$  sowie den Übergangszeiten  $t_{GB}$  (GELB) und  $t_{RG}$  (ROT/GELB) zusammen. Die Umlaufzeit  $t_U$  ( $T_{zykl}$ ) der LSA beträgt somit:

$$t_U = t_{GR} + t_R + t_{GB} + t_{RG}. \quad (3.1)$$

Für die Strategieauswahl dienen die Freigabe  $t_F$  und die Sperrzeit  $t_S$ . Welche sich anteilig aus den Signalphasen  $t_G$ ,  $t_R$ ,  $t_{GB}$  und  $t_{RG}$  zusammensetzen.

$$t_F = t_G + \frac{1}{2} t_{GB} \quad (3.2)$$

$$t_S = t_R + \frac{1}{2} t_{GB} + t_{RG} \quad (3.3)$$

Die Festzeitsteuerung bildet das einfachste Steuerungsverfahren einer LSA. Um weiterführende Untersuchungen für die Alltagstauglichkeit eines Assistenzsystems zu unternehmen, erscheint es daher sinnvoll das Steuerungsverfahren komplexer zu gestalten.

Für eine Strategieauswahl ist neben den Laufzeiten der Signalphasen noch die Entfernung zur Haltelinie relevant. Dazu wurde in [HAN09] ein Verfahren zur Fahrzeugortung relativ zur Lichtsignalanlage entwickelt.

### 3.3.2 FAHRZEUGORTUNG

Aus den GPS Koordinaten lässt sich über folgenden Zusammenhang die Entfernung zweier Punkte auf der Erdoberfläche ermitteln. Gegeben seien die Punkte  $A(\varphi_A, \lambda_A)$  und  $B(\varphi_B, \lambda_B)$ . Die Erdoberfläche beschreibt eine Kugel. Der kürzeste Abstand zweier Punkte auf der Kugeloberfläche wird als Orthodrome bezeichnet. Für relativ geringe Entfernungen im Vergleich zum Erdkugeldurchmesser, also in Größenordnungen von wenigen Kilometern, kann in Näherung auf den Einfluss der Krümmung der Erdoberfläche verzichtet werden. Für die Transformation in kartesische Koordinaten gilt:

$$x = r_{Erd} \cdot \frac{\pi \cdot \varphi}{180^\circ} \quad (3.4)$$

$$y = r_{Erd} \cdot \frac{\pi \cdot \lambda}{180^\circ} \cdot \cos(\varphi) \quad (3.5)$$

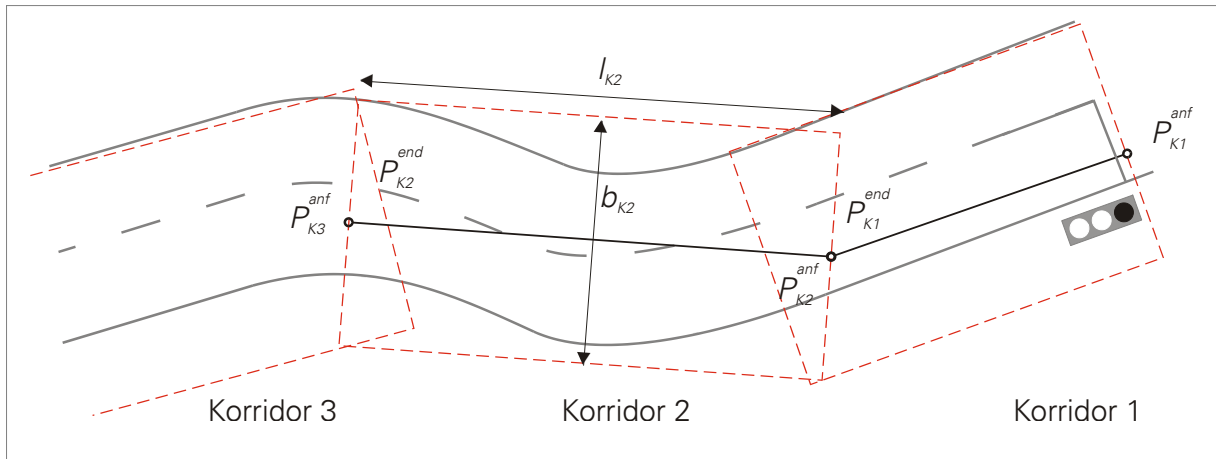
Die Entfernung der beiden Punkte  $A$  und  $B$  ergibt sich nun aus dem Zusammenhang:

$$d_k = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \quad (3.6)$$

#### Fahrspurkorridor

Die Restlaufzeiten und alle übrigen Daten des Knotenpunktes werden über das WLAN-Modul kontinuierlich gesendet. Dabei wird jeder Knotenpunktzufahrt eine Identifikationsnummer zugewiesen, sodass eine eindeutige Zuordnung der relevanten Daten zum ankommenden Fahrzeug möglich ist. Jede Zufahrt ist als sogenannter Fahrspurkorridor modelliert, welcher aus mehreren Abschnitten bestehen kann, da der Anfahrweg nicht zwingend durch eine Gerade beschrieben wird (siehe **Abbildung 3-4**).

Die einzelnen Abschnitte werden durch einen Anfangspunkt  $P_{K_i}^{anf}$  und einen Endpunkt  $P_{K_i}^{end}$  sowie eine spezifische Breite  $b_k$  definiert und bilden somit ein Rechteck. Die Aneinanderreihung mehrerer Rechtecke ergibt den approximierten Streckenverlauf vor der LSA. Falls sich die ermittelte GPS-Position innerhalb dieses Korridors befinden, kann die entsprechende Zuordnung erfolgen und anhand der Entfernung und der Restlaufzeit eine passende Annäherungsstrategie berechnet werden.



**Abbildung 3-4:** Fahrspurkorridor für Zuordnung der Signalgruppe [HAN09]

Für die Entfernung des Fahrzeugs zur Haltelinie vor der LSA ergibt sich:

$$d_{LSA} = \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} l_{K_i} \right\}_{n>1} + d_{K_n} \quad (3.7)$$

Ausgehend von der aktuellen Position des Fahrzeugs im Korridor  $n$  und der daraus resultierenden Entfernung  $d_{K_n}$  zum Anfangspunkt des Korridors  $P_{K_n}^{anf}$  und der Summe der Längen aller vorausliegenden Korridore, kann die Entfernung zur LSA berechnet werden.

Im aktuellen Quelltext wurde der Fahrspurkorridor aufgrund der räumlichen Gegebenheiten des Testgeländes nur mit einem Abschnitt realisiert, sodass die Anfahrstrecke auf etwa 180 Meter begrenzt ist. Eine Erweiterung der Anfahrstrecke ist denkbar, jedoch schließt dies eine Verbesserung der Funksignalreichweite ein.

### 3.3.3 KOMMUNIKATIONS DATEN DES AMPELMODULS

Über die Kommunikationsschnittstelle zwischen dem Fahrzeugmodul und der Ampel werden kontinuierlich Daten übertragen. Diese beinhalten nachstehende Informationen:

- die Restlaufzeiten bis zum Freigabebeginn und Freigabeende aller 4 Fahrtrichtungen,
- die Gesamtzeit einer vollständigen Grünphase und eines kompletten Signalzyklus,
- die einzelnen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten für alle 4 Fahrtrichtungen,
- die Koordinaten der Korridorstützstellen aller 4 Knotenpunktzufahrten und
- die Parameter für die Breite, die Überlappungsbereiche und den möglichen Winkelbereich der einzelnen Korridore.

Eine genaue Aufschlüsselung der Daten zeigt **Tabelle 3-2**. Darin wird der genaue Aufbau einer CAN-Botschaft gezeigt.

**Tabelle 3-2:** Aufbau der CAN Botschaft

CAN Messages		Daten							
Identifizier hex (dec)	DLC	Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7
0x0100 (16)	8	Grünbeginn t_gb				Grünende t_ge			
		SG1	SG2	SG3	SG4	SG1	SG2	SG3	SG4
0x0200 (32)	8	Daten der einzelnen Signalgruppen (SG) der Lichtsignalanlage (zyklische Übermittlung id=0...3)							
		id	v_zul(id)	b_K(id)	T_Ul(id)	t_g (id)	l_anf(id)	l_end(id)	winkel(id)
0x0300 (48)	8	Anfangspunkt Fahrspurkorridor - Lateral (Position der Signalgruppe)							
		Byte7	Byte6	Byte5	Byte4	Byte3	Byte2	Byte1	Byte0
0x0400 (64)	8	Anfangspunkt Fahrspurkorridor - Longitudinal (Position der Signalgruppe)							
		Byte7	Byte6	Byte5	Byte4	Byte3	Byte2	Byte1	Byte0
0x0500 (80)	8	Endpunkt Fahrspurkorridor - Longitudinal							
		Byte7	Byte6	Byte5	Byte4	Byte3	Byte2	Byte1	Byte0
0x0600 (96)	8	Endpunkt Fahrspurkorridor - Lateral							
		Byte7	Byte6	Byte5	Byte4	Byte3	Byte2	Byte1	Byte0

Der LSA-Datensatz wird im Fahrzeugmodul empfangen, dekodiert und zur Weiterverarbeitung ausgewertet.

### 3.3.4 STRATEGIEANSATZ

In [HAN09] werden zwei Annäherungsstrategien an eine Lichtsignalanlage vorgestellt. Diese verfolgen das Ziel, energetisch ungünstige Fahrprofile (siehe **Tabelle 3-1**) zu vermeiden. Sie sind wie folgt definiert:

- **Stillstandsvermeidungsstrategie** - Passieren der Haltelinie ohne Fahrzeugstillstand
- **Strategie mit Stillstand** - energetisch günstiges Annäherungsverhalten an die Haltelinie (z.B. Ausrollen), falls ein Stillstand nicht vermieden werden kann

Ausgehend von der aktuellen Fahrgeschwindigkeit, der sich ergebenden Entfernung zur LSA, der Signallaufzeiten und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit wird eine Strategie ausgewählt, welche dem Fahrzeugführer als Zielgröße auf dem Display visualisiert wird.

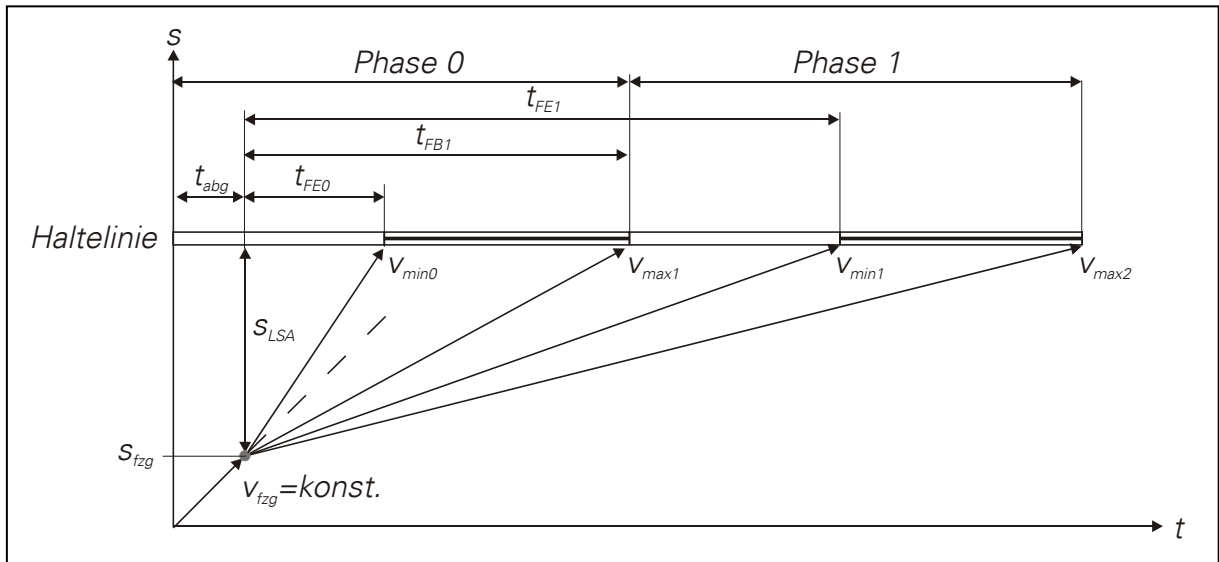
Bei der Entwicklung des Algorithmus wurden einige Annahmen getroffen.

- einzelnes Fahrzeug was sich auf lichtsignalgesteuerte Kreuzung zubewegt
- zulässiger Geschwindigkeitsbereich  $v_{krit,min} = 25 \text{ km/h} < v_{Fzg} < v_{zul} = 40 \text{ km/h}$
- Auslegung der Strategie auf 20 m vor HL, danach „Systemabschaltung“
- maximale komfortable Beschleunigung  $a = 1,5 \text{ m/s}^2$



Aus den erhaltenen Eingangsgrößen findet unter den gegebenen Rahmenbedingungen die Ermittlung der Fahrstrategie statt. Zur Veranschaulichung des Ablaufes einer Strategiebestimmung dient das in **Abbildung 3-5** dargestellte Weg-Zeit-Diagramm.

Gezeigt ist eine mögliche Variation der aktuellen Fahrzeugposition bezüglich der Entfernung zur Haltelinie. Die zum Zeitpunkt der LSA-Detektion aktive Signalphase wird als Phase 0 bezeichnet. Alle darauf folgenden Phasen werden aufsteigend durchnummeriert, wobei zu den Zeiten für Freigabebeginn  $t_{FB}$  bzw. Freigabeende  $t_{FE}$  die Umlaufzeit entsprechend aufsummiert wird.



**Abbildung 3-5:** Schematische Darstellung der Fahrsituation (vgl. [HAN09])

Zur Ermittlung der erforderlichen Fahrgeschwindigkeit für eine Überfahrt der Haltelinie zum frühestmöglichen Zeitpunkt sind folgende Größen definiert.

Die Geschwindigkeiten  $v_{max,i}$  und  $v_{min,i}$  sind die Geschwindigkeiten, welche ausgehend von der aktuellen Entfernung zur LSA  $s_{LSA}$  gefahren werden müssten um die Haltelinie genau bei Freigabebeginn  $t_{FB,i}$  bzw. Freigabeende  $t_{FE,i}$  der Phase  $i$  zu erreichen.

$$v_{max,i} = \frac{s_{LSA}}{t_{FB,i}} \quad \text{mit} \quad t_{FB,i} = t_{FB,0} + i \cdot T_{zykl} \quad (3.8)$$

$$v_{min,i} = \frac{s_{LSA}}{t_{FE,i}} \quad \text{mit} \quad t_{FE,i} = t_{FE,0} + i \cdot T_{zykl} \quad (3.9)$$

Diese Geschwindigkeiten müssen nicht zwangsläufig realisierbare Werte annehmen, da sie lediglich als Auswahl einer geeigneten Strategie dienen und demnach noch auf Plausibilität geprüft werden. Dafür ist der Geschwindigkeitsbereich festgelegt, in dem sich das Fahrzeug frei bewegen kann. Dieser ist durch die zulässige Höchstgeschwindigkeit  $v_{zul}$  und eine akzeptable Mindestgeschwindigkeit  $v_{akz,min}$  ([NEU03]) begrenzt.

$$v_{akz,min} = 0.6 \cdot v_{zul} \tag{3.10}$$

Unter Berücksichtigung der aktuellen Entfernung  $s_{LSA}$  und der aktuellen Fahrgeschwindigkeit  $v_{FZg}$  wird geprüft, in welcher Phase eine Querung der HL prinzipiell möglich ist und welche Strategie dafür in Frage kommt. Dazu erfolgt ein Vergleich der festgelegten Geschwindigkeitsregelgrenzen  $v_{zul}$  und  $v_{akz,min}$  mit den Geschwindigkeiten  $v_{max,i}$  und  $v_{min,i}$ . Nachdem die entsprechende Strategie ermittelt wurde, wird sie dem Fahrer über eine Informationsanzeige visualisiert.

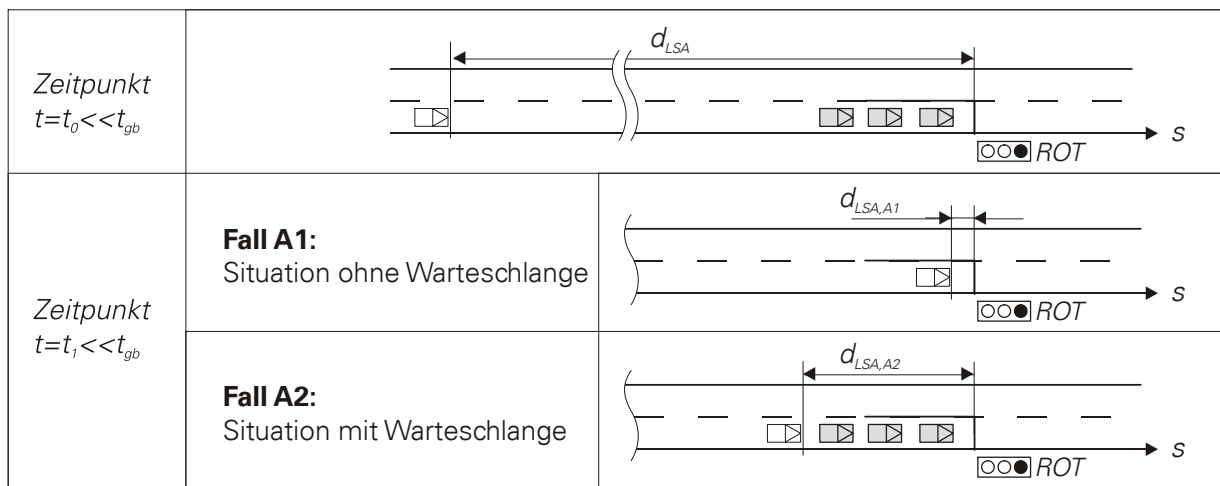
### 3.4 ANALYSE DER STRATEGIEEMPFEHLUNG

Die Analyse des Systems zeigt Verbesserungspotential an unterschiedlichen Stellen. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Strategieempfehlung. Das bisherige System ist nur für wenige Fahrsituationen ausgelegt. Im Folgenden werden daher mögliche Situationen erläutert, welche das derzeitige System negativ beeinflussen.

Untersuchungen in [DOR04] haben gezeigt, dass die vorgeschlagenen Strategien zur Annäherung an einen Knotenpunkt mit LSA ihre Vorteile schnell verlieren können, wenn sich auf dem vorausliegenden Streckenabschnitt, also zwischen dem eigenen Fahrzeug und der LSA, andere Verkehrsteilnehmer befinden. Die genauere Betrachtung des Einsatzes dieses Systems im realen Straßenverkehr führte auf nachstehende potentielle Problemsituationen:

- Fall A: Fahrzeug kommt in größerem Abstand vor Haltelinie zum Stillstand
- Fall B: Überfahren der Haltelinie erst später möglich

Zur Veranschaulichung der beiden Fälle dienen **Abbildung 3-6** und **Abbildung 3-7**.

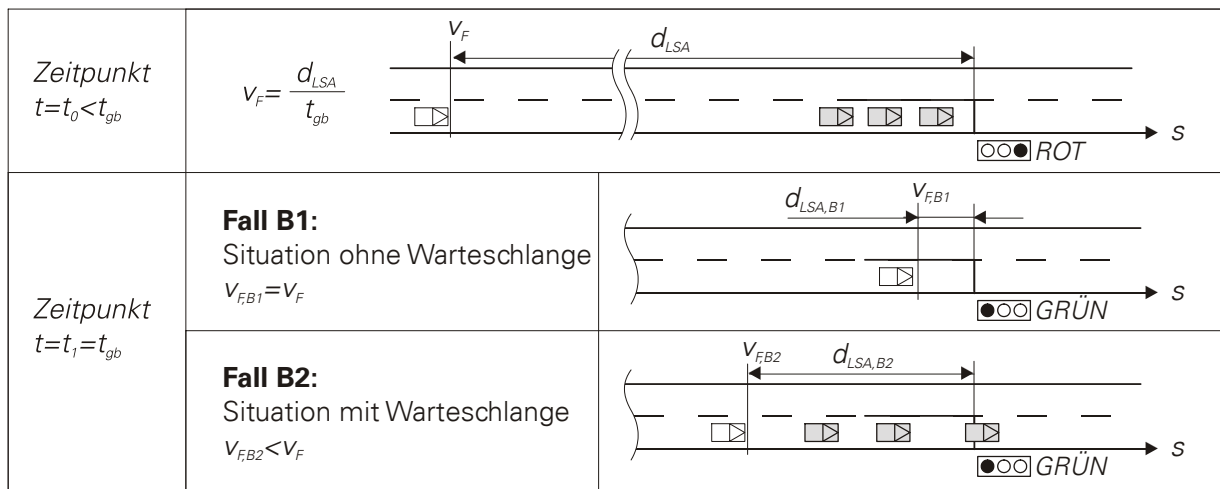


**Abbildung 3-6:** Fall A: Abweichung zwischen Ort des Fahrzeugstillstandes und Entfernung zur LSA

Für **Fall A** ergibt sich folgende Problemstellung. Das Fahrzeug nähert sich mit der empfohlenen Strategie der HL. Aufgrund der Warteschlange, die sich infolge der Signalphase ROT gebildet hat, kommt es bereits früher zum Stillstand des Fahrzeugs (Fall A2). Das Fahrprofil für die Annäherung weicht vom berechneten Profil (Fall A1) ab.

Die Strategie mit Stillstand muss also die Länge der Warteschlange berücksichtigen, welche sich an der HL gebildet hat. Da sich die Entfernung des Punktes zur Haltelinie, an dem das Fahrzeug voraussichtlich zum Stillstand kommt mit zunehmender Verkehrsstärke erhöht, und somit einen steigenden Einfluss auf die Funktionsweise des Systems ausübt.

Den entscheidenden Einfluss auf die nur bedingte Tauglichkeit des Systems erzeugt jedoch **Fall B**. Bei der Annäherung an die Haltelinie mit der vorgeschlagenen konstanten Fahrge-  
 schwindigkeit  $v_F$ , schließt der Fahrer zu schnell auf die wartenden Fahrzeuge (Fall B2) auf. Diese befinden sich unmittelbar nach dem Signalwechsel beim Anfahrvorgang und behindern demnach das ankommende Fahrzeug, welches somit die Haltelinie erst zu einem späteren Zeitpunkt mit einer geringeren Geschwindigkeit  $v_{F,B2}$  als prognostiziert (Fall B1) über-  
 queren kann.



**Abbildung 3-7:** Fall B: Abweichung vom Zeitpunkt der Überfahrt der HL

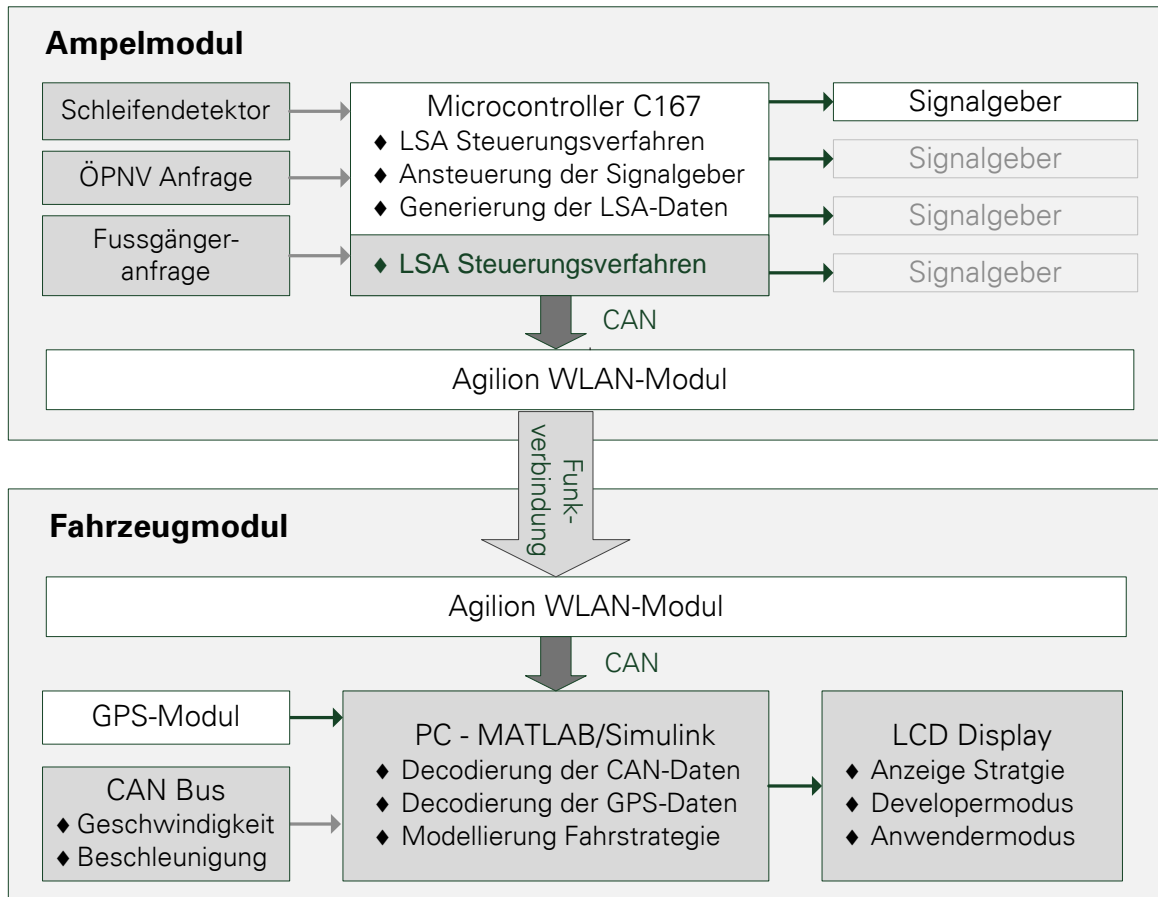
Bei einer relativ kurzen Grünphase in Verbindung mit einer langen Warteschlange kann es sogar vorkommen, dass die Überquerung der Haltelinie in der aktuellen Signalphase nicht mehr möglich ist. Bei der Stillstandsvermeidungsstrategie muss daher die Zielgeschwindigkeit an den Einfluss anfahrender Fahrzeuge angepasst werden. Und im Einzelfall geprüft werden, ob die Überquerung der Haltelinie noch in der aktuellen Phasen durchführbar ist.

### 3.5 OPTIMIERUNGSANSÄTZE

Neben der Erweiterung der Strategieempfehlung um die angesprochenen Punkte ergeben sich einige weitere Verbesserungsmöglichkeiten für das bestehende System. Anhand **Abbildung 3-8** wird das Verbesserungspotential auf Grundlage von **Abbildung 3-2** visualisiert. Die hervorgehobenen Komponenten bieten die Möglichkeit zur Systemerweiterung.

Die Ansatzpunkte für die Optimierung des bestehenden Systems werden in die Bereiche Hard- und Software untergliedert. Durch den Einsatz eines PCs anstelle des C167 ist es möglich ein sehr viel komplexeres System zu entwerfen, was zudem die Vorteile bietet, dass es leistungsfähiger ist und Modifikationen mit geringerem Aufwand ermöglicht. Weiterhin spielt die einfache Datenaufzeichnung, welche eine spätere Auswertung von Versuchsdaten ermöglicht, bei der Entwicklung des Systems eine wichtige Rolle. Bei der Ver-

wendung eines vollwertigen LCD-Displays anstelle des monochromen 4-Zeilen-Displays wird schnell deutlich, dass eine vielfältigere Umsetzung der Anzeige zum einen für den Entwickler und zum anderen für den Nutzer des Systems denkbar ist. Natürlich ist für eine spätere Serienproduktion eines FAS eine Miniaturisierung notwendig, jedoch ist dies nicht Ziel der vorliegenden Arbeit.



**Abbildung 3-8:** Prinzipieller Aufbau und Struktur des Fahrerassistenzsystems – Ansätze für die Optimierung sind dunkelgrau hervorgehoben – nach EVA Prinzip (Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe)

Derzeit wird die Fahrgeschwindigkeit aus den GPS-Daten ermittelt. Um exakte Kenngrößen über den aktuellen Fahrzustand des Versuchsträgers zu erhalten, sollte eine Anbindung an den Antriebs-CAN-Bus erfolgen. Bei einer Entfernung von etwa 180 Meter kann festgestellt werden, dass nicht mehr alle Informationen der LSA beim Empfänger im Fahrzeug ankommen. Dies ist einerseits auf den Einsatz der Module und den Funkstandard 802.15.4, andererseits auf die genutzten Antennen zurückzuführen. Weiterhin erfolgt eine Abschirmung des Funksignals aufgrund der Beschaffenheit des Versuchsgeländes.

Weitere Maßnahmen sind die Erweiterung der LSA um benötigte Sensoren für die Untersuchung des Einflusses von Fußgänger- und ÖPNV-Anfragen sowie Schleifendetektoren für die Erkennung von Fahrzeugen auf dem Streckenabschnitt vor der Haltelinie. Diese dienen sowohl zur Klassifizierung, als auch zur Ermittlung der Geschwindigkeiten von Verkehrsteilnehmern. Zudem sind sie die Grundlage für die Erweiterung des LSA-Steuerungsverfahrens. Derzeit ist eine Festzeitsteuerung implementiert, die jedoch im urbanen Verkehr zunehmend

eine Ausnahme darstellt. Eine Implementierung eines adaptiven Steuerungsverfahrens ist vorstellbar. Im Folgenden sind die Ergebnisse der vorangegangenen Analyse in übersichtlicher Form zusammengefasst.

**Tabelle 3-3:** Übersicht über Verbesserungsansätze. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erweiterten Komponenten sind grau hinterlegt.

		<b>Komponente</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>Hardware</b>	<b>LSA Modul</b>	Schleifendetektor	Erkennung von Fahrzeugen vor HL (Anzahl, Art und Geschwindigkeit)
		ÖPNV Anfrage	ÖPNV Anforderungseinrichtung
		Fußgängeranfrage	Fußgängeranforderungseinrichtung
	<b>Fahrzeugmodul</b>	PC als Steuergerät	Steigerung der Leistungsfähigkeit, Steigerung der Flexibilität bei der Erweiterung und einfache Aufzeichnung von Versuchsfahrten.
		Zugriff auf CAN-BUS	exakte Ermittlung von Geschwindigkeit und Beschleunigung
		LCD Display	notwendig zur Bedienung des PCs mehr Flexibilität bei der Ausarbeitung der GUI/HMI
<b>Funkmodul</b>	Antenne	Erweiterung der Anfahrstrecke durch Erhöhung Signalstärke	
<b>Software</b>	<b>LSA Modul</b>	Steuerungsverfahren	Implementierung dynamischer Signallaufzeiten ÖPNV Bevorrechtigung und Fußgängeranforderungen
	<b>Fahrzeugmodul</b>	MATLAB/SIMULINK	bewährte Softwareumgebung zur Modellierung
		Funkverbindung	Implementierung einer Fehlerbehandlung bei Aussetzern
		Strategie	Erweiterung des zeitlichen Entscheidungshorizontes durch Anpassung der Geschwindigkeitsregelschwellen Berücksichtigung vorausfahrender Verkehrsteilnehmer

Nach Abschluss der Analyse schließt sich in **Kapitel 4** die Erweiterung des Systems an.

## 4 ERWEITERTER SYSTEMENTWURF

Aufbauend auf den Ergebnissen aus **Kapitel 3** wird der Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer untersucht und eine Erweiterung der Strategie vorgenommen. Weiterhin erfolgt eine Anpassung der Geschwindigkeitsregelgrenzen zur Verbesserung der Systemreichweite. Für die Eignung eines FAS in Verbindung mit Bevorrechtigungen des ÖPNV werden ebenso einige Angaben getroffen.

### 4.1 RAHMENBEDINGUNGEN UND VORGABEN

Für die Optimierung des FAS und die spätere praktische Umsetzung werden einige Vorgaben getroffen, welche es ermöglichen ein FAS im Rahmen dieser Arbeit ohne erhöhten technischen Aufwand zu realisieren.

Um andere, speziell an der HL vor der Ampel wartende Fahrzeuge zu erkennen, gibt es verschiedene Arten von Detektoren. Erste Überlegungen führen dabei auf die Verwendung von Infrarotsensoren oder Schleifendetektoren (Induktionsschleifen). Im Rahmen der simulativen Untersuchung in **Kapitel 5** wird davon ausgegangen, dass die Art und Anzahl der vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer im Algorithmus bekannt ist. Die Implementierung einer Messeinrichtung für die praktischen Versuche wurde nicht umgesetzt. Folgende Vorgaben werden getroffen:

- Geschwindigkeitsvorgaben bis 20 Meter vor der Haltelinie
- Versuchsfahrzeug mit konventionellem Antriebsstrang
- Art und Anzahl der in der Rotphase  $i$  wartenden PKW bekannt
- maximale komfortable Beschleunigung  $a = 2 \text{ m/s}^2$
- maximale komfortable Verzögerung  $b = 1,5 \text{ m/s}^2$
- Fahrzeugführer nähert sich mit  $v_{zul}$  der LSA

### 4.2 ENTSCHEIDUNGSSYSTEM

Das in [DOR04] erarbeitete Ziel- und Entscheidungssystem für die Strategiewahl ist eine geeignete Grundlage zur Ermittlung eines optimalen Annäherungsverhaltens an eine LSA. Es dient daher weiterhin für die Erweiterung der Assistenzfunktion um die angesprochenen Punkte. Entsprechend **Tabelle 4-1** ist vorgesehen zuerst Zeit-, dann Akzeptanzaspekte und schließlich auf dritter Stufe den Kraftstoffverbrauch bei der Strategiewahl zu berücksichtigen.

Das Kriterium mit höchster Priorität ist die Zeit. Dem Fahrzeugführer soll somit ein Passieren der Haltelinie zum frühestmöglichen Zeitpunkt ermöglicht werden, was zur Optimierung des Verkehrsflusses anzustreben ist. Das zweite Kriterium für die Bestimmung der Annäherungsgeschwindigkeit ist die Akzeptanz. Die wichtigste Rolle spielen hierbei die Regelgrenzen für die Geschwindigkeitsempfehlung und komfortable Werte für Beschleunigung und

Verzögerung. Diese gewährleisten, dass der Fahrer die Strategie verfolgen kann und das Fahrzeug innerhalb der Regelgrenzen bewegt.

**Tabelle 4-1:** Dreistufiges Ziel- und Entscheidungssystem für die Assistenzstrategie ([DOR04] S.122)

Stufe	Beschreibung
<b>1 Zeit</b>	geringstmöglicher Zeitverlust beim Passieren der Halteline unter Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit <ul style="list-style-type: none"> <li>• Passieren der HL in frühestmöglicher Signalphase</li> <li>• Maximal mögliche Fahrgeschwindigkeit bei Passieren der HL</li> </ul>
<b>2 Akzeptanz</b>	akzeptable Geschwindigkeits- und Beschleunigungsempfehlungen <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geschwindigkeitsempfehlungen zwischen <math>v_{tho}</math> und <math>v_{thu}</math> (s. Kapitel 4.5)</li> <li>• komfortable Grenzen für Beschleunigung/Verzögerung (<math>a_{max} = \pm 1.5 \text{ m/s}^2</math>)</li> </ul>
<b>3 Kraftstoffverbrauch</b>	Erzielung des geringstmöglichen Gesamtverbrauchs bis zu einem definierten Ort nach der HL mit wiedererreichter Wunsch- bzw. zulässiger Höchstgeschwindigkeit <ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrenzung der Beschleunigung auf Verbrauchsoptimum (s.o.)</li> <li>• Nutzung verschiedener Möglichkeiten zur Verbrauchsreduzierung <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Konstantfahrstrategie</li> <li>○ Verzögerungsstrategie</li> <li>○ Stillstandsmanagement (Start-Stopp)</li> </ul> </li> </ul>

Bei der Ermittlung einer Anfahrstrategie zur Stillstandsvermeidung ergibt sich zwangsläufig bei einer Reduzierung der Geschwindigkeit ein Kraftstoffeinsparpotenzial.

Das dritte Kriterium, der Kraftstoffverbrauch, wird vor allem bei der Strategie mit Stillstand bzw. dem Stillstandsmanagement mit Motor-Start-Stopp betrachtet. Weiterhin erfolgt die Implementierung einer Ausrollstrategie, wenn ein Fahrzeugstillstand nicht vermeidbar ist.

### 4.3 EINFLUSS VON FAHRZEUGKOLONNEN

Die Ergebnisse der Untersuchungen aus [DOR04] zeigen, dass bereits durch eine frühzeitig eingeleitete Verzögerungsstrategie enorme Verbrauchsreduzierungen möglich sind. In der Praxis konnte das Einsparungspotential der umgesetzten Stillstandsvermeidungsstrategie jedoch bedingt durch dichtes Verkehrsaufkommen nicht nachgewiesen werden, da andere Verkehrsteilnehmer im Algorithmus keine Berücksichtigung finden. Die vorliegende Arbeit adressiert genau diesen Umstand und schlägt ein FAS vor, welches den Einfluss vorrausfahrender Fahrzeuge berücksichtigt, um die vorhandene System zu ergänzen.

Auf Grundlage der Ausführungen in [SCH97] zeigt **Abbildung 4-1** eine mögliche Annäherungssituation mehrerer Fahrzeuge an einen Knotenpunkt mit LSA. Die Ampel zeigt zum Zeitpunkt  $t_0$  Rot. Dies ist der Zeitpunkt, in dem die LSA erfasst wird. Die KFZ 1, 2 und 3 sind nicht mit dem Assistenzsystem ausgestattet. Sie nähern sich demnach mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit der HL. Vor dem Signalwechsel kommen sie an der HL zum Stillstand und bilden die Warteschlange (im Folgenden auch Pulk genannt).

Das Fahrverhalten eines Fahrzeuges ohne FAS wird durch KFZ 4A vermittelt. KFZ 4B ist mit dem ursprünglichen Assistenzsystem ausgestattet und verfolgt die Stillstandsvermeidungsstrategie. Aufgrund der fehlenden Information über die an der Haltelinie wartenden Verkehrsteilnehmer, wird diese durch den Fahrzeugführer abgebrochen, da es sonst zu einer Kollision kommen würde. Somit kann das angestrebte Energie-Einsparpotential nicht in vollem Umfang erreicht werden.

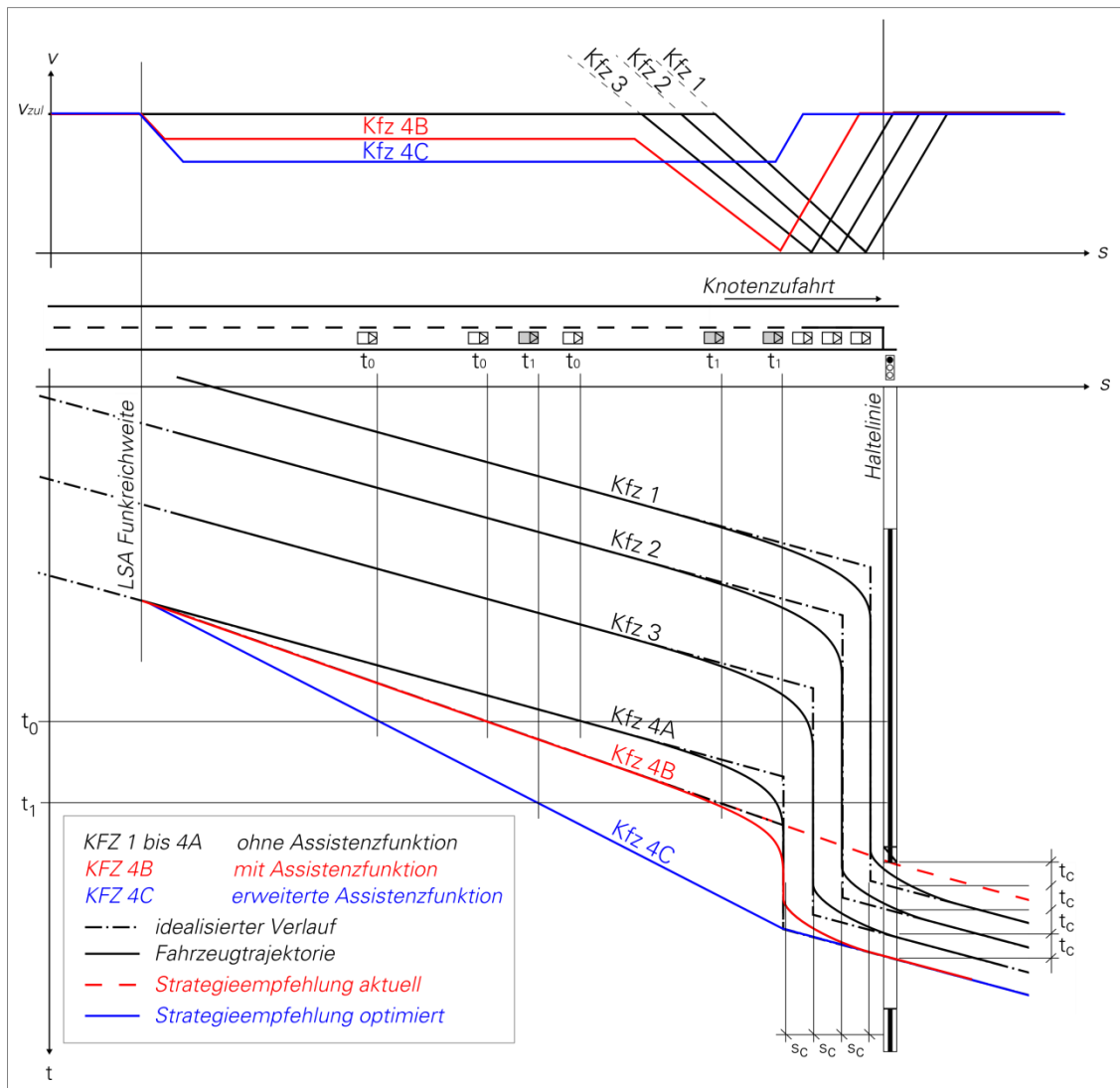


Abbildung 4-1: Fahrzeugtrajektorien in einer Signalzufahrt (vgl. [SCH97] S. 214)

Die Trajektorie von KFZ 4C verdeutlicht das Optimierungspotential der Assistenzfunktion unter Berücksichtigung anderer Fahrzeuge. Es ist gut erkennbar, dass eine Verzögerung auf eine geringere Annäherungsgeschwindigkeit bereits zu Beginn der Strategieauswahl die Überquerung der Haltelinie ohne Stillstand ermöglichen kann.



## 4.4 EFFEKTIVE FREIGABEZIT UND RÜCKSTAULÄNGE

An einer Knotenzufahrt mit Lichtsignalanlage kommt es für einen Teil der Verkehrsteilnehmer zwangsläufig zu einer Wartezeit. Diese stellt den durch die Lichtsignalsteuerung bedingten zeitlichen Mehraufwand dar, den ein Kraftfahrzeug gegenüber der behinderungsfreien Durchfahrt mit der Streckengeschwindigkeit  $v_{zul}$  benötigt. Die Haltelinie bildet dabei den Bezugsquerschnitt zur Ermittlung dieser Zeit. Durch eine frühzeitige Anpassung der Streckengeschwindigkeit kann dieser Mehraufwand bei der Annäherung an eine LSA berücksichtigt werden. Ziel dabei ist es, einen Fahrzeugstillstand zu verhindern. Befinden sich vor der Haltelinie bereits Fahrzeuge in einer Warteschlange, so erhöht sich der Mehraufwand.

Es ergibt sich zwischen der Überquerung zweier aufeinanderfolgender Kraftfahrzeuge eine konstante Zwischenzeit  $t_c$ . Für die ersten Fahrzeuge weicht diese minimal von der konstanten Vorgabe ab. Da die Fahrzeuge an der Haltelinie noch nicht die zulässige Höchstgeschwindigkeit erreicht haben. Mit steigender Position in der Warteschlange nimmt die Abweichung sehr schnell ab, sodass sie vernachlässigt werden kann. Im Algorithmus wird die Zwischenzeit in Form einer effektiven Freigabezeit modelliert. Abhängig von der Anzahl der Fahrzeuge  $N_i$ , die sich während der Sperrzeit  $t_{Si}$  der Phase  $i$  zwischen dem eigenen Fahrzeug und der Haltelinie befinden, ergibt sich für den Zeitpunkt des Freigabebeginns:

$$t_{FBi,eff} = t_{FBi} + N_i \cdot t_c \quad \text{für } t_{FBi,eff} < t_{FEi} . \quad (4.1)$$

Eine weitere, durch die Warteschlange bedingte Anpassung des Algorithmus ist die virtuelle Haltelinie. Sie beschreibt den voraussichtlichen Punkt des Stillstands und ist für die Strategie mit Stillstand relevant. Die virtuelle Haltelinie  $s_{LSA,virt}$  setzt sich aus der Anzahl der Fahrzeuge  $N_i$ , der Fahrzeuglänge  $l_{FZG}$  und dem minimalen Abstand zwischen den Fahrzeugen  $s_0$  zusammen. Für einheitliche Fahrzeuglängen und Abstände ergibt sich für die virtuelle Haltelinie:

$$s_{LSA,virt} = s_{LSA} - N \cdot s_c . \quad (4.2)$$

$$s_c = l_{fzg} + s_0 \quad (4.3)$$

Auf diese Weise ist eine Berücksichtigung vorausfahrender Verkehrsteilnehmer mit den genannten Einschränkungen möglich. Eine Erweiterung des Algorithmus über eine Klassifikation unterschiedlicher Fahrzeuge ist auf einfache Weise möglich.

## 4.5 UNTERSUCHUNG DER GESCHWINDIGKEITSREGELGRENZEN

Bei der Annäherung an einen Knotenpunkt mit LSA spielen sowohl die maximale, als auch die minimale Annäherungsgeschwindigkeit eine wichtige Rolle. Letztere hat Auswirkungen auf den Folgeverkehr und sollte deshalb einen akzeptablen Wert annehmen, der vom Fahrzeugführer eingehalten wird, ohne dass dieser ihn als zu gering einschätzt und die Empfehlung nicht beachtet. Darum wird diese Geschwindigkeit im Folgenden auch als akzeptable Mindestgeschwindigkeit bezeichnet. In [DOR04] und auch [HAN09] werden konstante Wer-

te für die untere Geschwindigkeitsregelgrenze vorgegeben. Die Akzeptanz dieser minimalen Geschwindigkeit hängt stark ab:

- von der Entfernung zum voraussichtlichen Ort des Stillstands vor der Haltelinie,
- der Sichtweite zum Signalgeber und
- der Dauer der aktuellen Signalphase.

Neben der Übermittlung der RLZ der jeweiligen Signalgeber erfolgt ebenfalls eine Übermittlung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im jeweiligen Korridor vor der LSA. Aus diesen Daten und der ermittelten Position wird ein Bereich ermittelt, in dem die HL durch Variation der Annäherungsgeschwindigkeit innerhalb der unteren Regelgrenze  $v_{thu}$  und der oberen Regelgrenze  $v_{tho}$  erreicht werden kann. Die zulässige Streckengeschwindigkeit  $v_{zul}$  definiert dabei die obere Grenze. Es gilt:

$$v_{tho} = v_{zul} \cdot \quad (4.4)$$

Zur Anpassung der unteren Schwellen an unterschiedliche Richtgeschwindigkeiten, wird der Mindestgeschwindigkeitsfaktor  $f_{thu}$  eingeführt. Es folgt:

$$v_{thu} = f_{thu}(d_{LSA}) \cdot v_{zul} \cdot \quad (4.5)$$

Laut [DOR04] beträgt diese Geschwindigkeit  $v_{akz,min} = 30km/h$  bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von  $v_{zul} = 50km/h$ . Dies entspricht einem Wert von  $f_{thu} = 0.6$ . Bei konstanter Regelgrenze ist es erforderlich die Reichweite des Systems zu begrenzen um den Folgeverkehr nicht zu behindern. Darum schlägt das System in [AUD09] beispielsweise dem Fahrer ca. 200 Meter vor der Haltelinie eine Geschwindigkeit vor. Der zeitliche Entscheidungshorizont  $T_{EH}$ , also die Zeitspanne zwischen dem frühesten und dem spätesten Ankunftszeitpunkt an der Haltelinie unter Einhaltung der maximalen und minimalen mittleren Geschwindigkeiten, wird darum einschränkt. Diese Reichweite kann unter Umständen deutlich erhöht werden.

Die Vorteile und Nachteile verschiedener Ansätze für die untere Geschwindigkeitsregelschwelle werden in **Tabelle 4-2** gegenübergestellt.

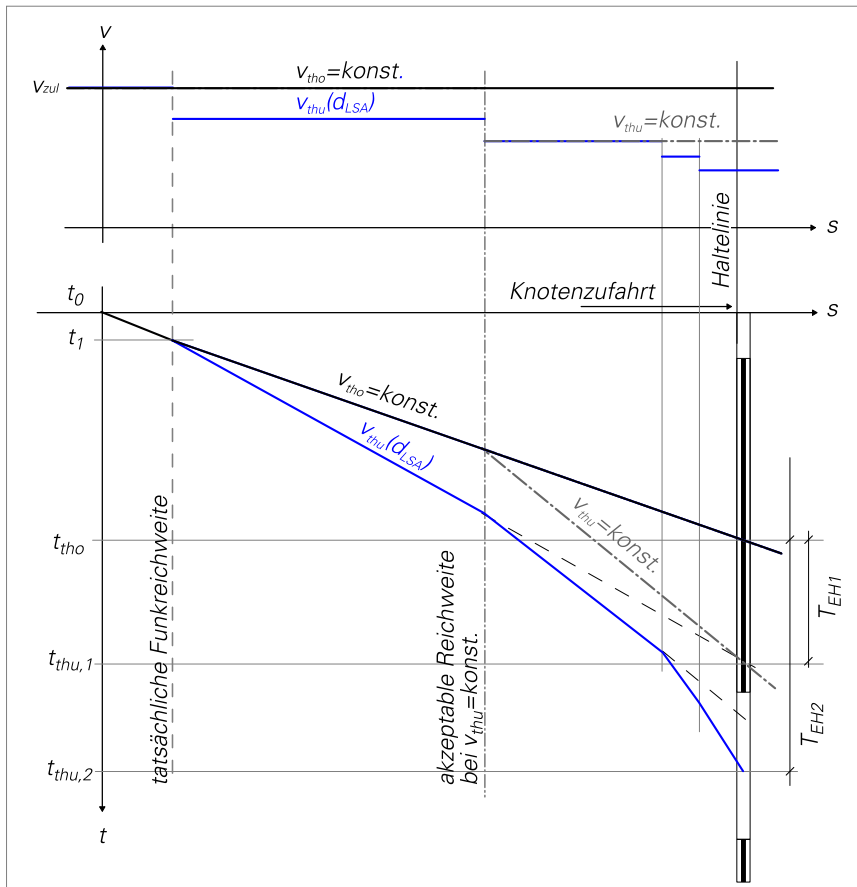
**Tabelle 4-2:** Vergleich konstante und entfernungsabhängige Regelschwelle

Kriterium	$v_{thu} = konst$	$v_{thu} = f(d_{LSA})$	
		Approximation	Wurzelkurve
<b>Komplexität</b>	niedrig	mittel	hoch
<b>Reichweite durch Akzeptanz</b>	eingeschränkt	sehr gut	sehr gut
<b>Entscheidungshorizont mit Akzeptanzbetrachtung<sup>1</sup></b>	gut	deutliche Steigerung	deutliche Steigerung
<b>Auswirkung</b>	gutes Potential	erhöhtes Potential	erhöhtes Potential

<sup>1</sup> Bei konstanter Regelschwelle wird die Reichweite auf 200 Meter begrenzt

Für die spätere Strategieauswahl hat es sich als praktikabel erwiesen die Zeitpunkte  $t_{tho}$  und  $t_{thu}$  als Kriterium zum Vergleich mit den Zeitpunkten für Grünbeginn  $t_{gb}$  und –ende  $t_{ge}$  zu nutzen. Diese definieren die Zeiten, zu denen ausgehend von der aktuellen Fahrzeugposition die Haltelinie frühestens bzw. spätestens erreicht werden kann.

Aufgrund der einfachen Umsetzbarkeit und der in **Abbildung 4-2** dargestellten Verbesserung des Entscheidungshorizontes  $T_{EH2}$  wird für den Algorithmus eine stufenweise approximierte Regelschwelle genutzt.



**Abbildung 4-2:** Vergleich der entfernungsabhängigen mit der konstanten Regelschwelle unter Beachtung des Akzeptanzkriteriums Reichweite

### Herleitung der Wurzelfunktion

Um den zeitlichen Entscheidungshorizont der Assistenzfunktion zu steigern ohne Einbußen bei der Akzeptanz durch den Fahrzeugführer in Kauf nehmen zu müssen, ist es sinnvoll die untere Geschwindigkeitsregelschwelle entfernungsabhängig zu gestalten. Zur Modellierung der Grenze wird eine Wurzelfunktion verwendet. Die allgemeine Grundgleichung lautet:

$$f(x) = a\sqrt{x} + b . \quad (4.6)$$

Für den entfernungsabhängigen Mindestgeschwindigkeitsfaktor  $f_{thu}$  folgt daraus:

$$f_{thu}(d_{LSA}) = a \cdot \sqrt{d_{LSA}} + b . \quad (4.7)$$

Als Vorgaben dienen zwei Stützstellen. Zum einen soll die Grenze bei einer Entfernung von  $d_{LSA} = 200m$ , wie der bisherige Ansatz [HAN09] eine untere Geschwindigkeit von  $v_{thu} = 0.6 v_{zul}$  zur Verfügung stellen. Weiterhin soll die Funktion auf eine Entfernung von  $d_{LSA} = 1000m$  begrenzt sein.

<b>Punkt A (<math>d_{LSA} = 200 ; f_{thu} = 0.6</math>)</b>	<b>Punkt B (<math>d_{LSA} = 1000 ; f_{thu} = 1.0</math>)</b>
$f_{thu}(200) = 0.6$	$f_{thu}(1000) = 1.0$

Nach Einsetzen der Nebenbedingungen in Gleichung (4.7) ergibt sich folgendes nichtlineares Gleichungssystem:

$$I: \quad 0 = a\sqrt{200} + b - 0.6 \quad (4.8)$$

$$II: \quad 0 = a\sqrt{1000} + b - 1.0 \quad (4.9)$$

Die numerische Lösung führt auf folgende Werte für die unbekanntenen Größen:

$$a = 0.0229$$

$$b = 0.02764$$

Nach Einsetzen der ermittelten Parameter in Gl. (4.6) kann eine sehr präzise Angabe der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Entfernung zur HL erfolgen.

## 4.6 ÖPNV - UMGANG MIT DYNAMISCHEN SIGNALLAUFZEITEN

Um die Attraktivität des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) zu steigern, ist dieser auf Zuverlässigkeit und Pünktlichkeit bei jeder Verkehrslage angewiesen. Darum wurden in den letzten Jahren Systeme eingeführt, welche dem ÖPNV erlaubt Anfragen an LSA zu stellen, um Signallaufzeiten zu optimieren, damit dieser schnellstmöglich die Kreuzung passieren kann. Dies führt jedoch zwangsläufig zu Einschränkungen beim Individualverkehr und verschlechtert die Vorhersagbarkeit der Signallaufzeiten. Die Einhaltung einer Strategieempfehlung wird somit teilweise unmöglich, da es vorkommen kann, dass sich die Laufzeiten plötzlich ändern, und keine Querung mehr möglich ist, obwohl dies prognostiziert wurde. In **Tabelle 4-3** werden die Umschaltverfahren mit ihrer Eignung kurz erläutert.

**Tabelle 4-3:** Umschaltverfahren und der Einfluss auf den Nutzen der Assistenzfunktion

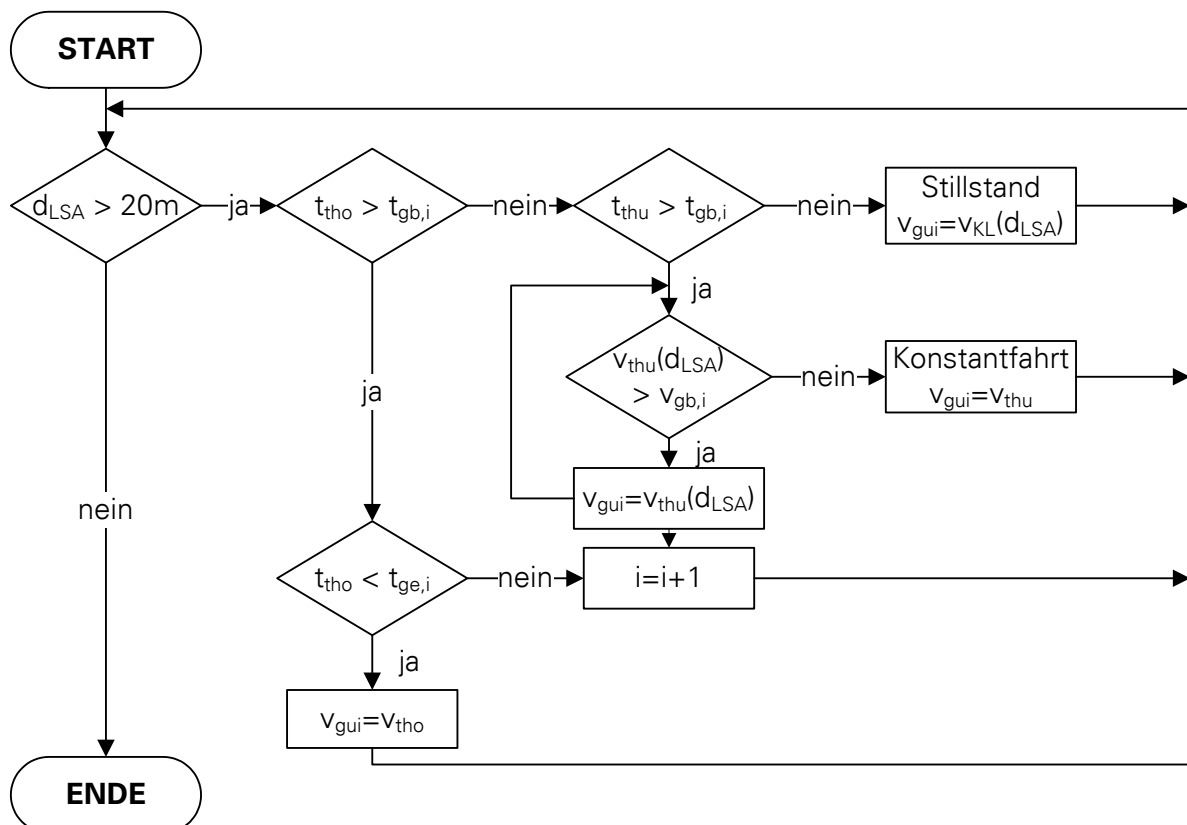
<b>Umschaltverfahren</b>	<b>Beeinträchtigung des FAS</b>	
Umschaltung zum Zeitpunkt	mittel	feste Umschaltzeitpunkte können berücksichtigt werden
Umschaltung nach dem Stauch-/Dehnverfahren	sehr hoch	Umschaltung jederzeit möglich Keine Reaktionszeit im Algorithmus möglich
Umschaltung ohne definierten Umschaltzeitpunkt	hoch	beim Umschaltvorgang werden Mindestfreigabezeiten, bzw. maximale Sperrzeiten eingehalten Reaktion im Algorithmus auf Änderungen im Signalablauf der LSA möglich

Im Normalfall wird ein Fahrzeug des ÖPNV unmittelbar vor der Kreuzung durch geeignete Sensoren (z.B. Lichtschranken) erkannt und daraufhin im Steuergerät der LSA ein Umschaltwunsch generiert. Darauf aufbauend erfolgt der Wechsel in ein anderes Signalprogramm. Wie bereits in **Kapitel 2.6** beschrieben, erfolgt dieser nach definierten Regeln [FGS10]. Demzufolge hängt die Eignung des FAS bei der Annäherung an Knotenpunkte, welche durch den ÖPNV beeinflussbar sind, stark vom eingesetzten Umschaltverfahren ab. Die Vorhersagbarkeit der Freigabezeiten wird im Wesentlichen durch das Steuerungsverfahren der LSA beeinflusst.

Lediglich bei einer Festzeitsteuerung ist stets eine verbindliche Information der Signallaufzeiten möglich, da sich über längere Zeit keine Veränderung im Programmablauf ergeben. Dieses ist außerdem das einzige Verfahren, welches keine ÖPNV-Bevorrechtigungsmaßnahmen gestattet. Bei anderen Steuerungsverfahren muss im Einzelfall geprüft werden, inwieweit eine Vorhersage möglich ist.

#### 4.7 ERMITTLUNG EINER FAHRSTRATEGIE

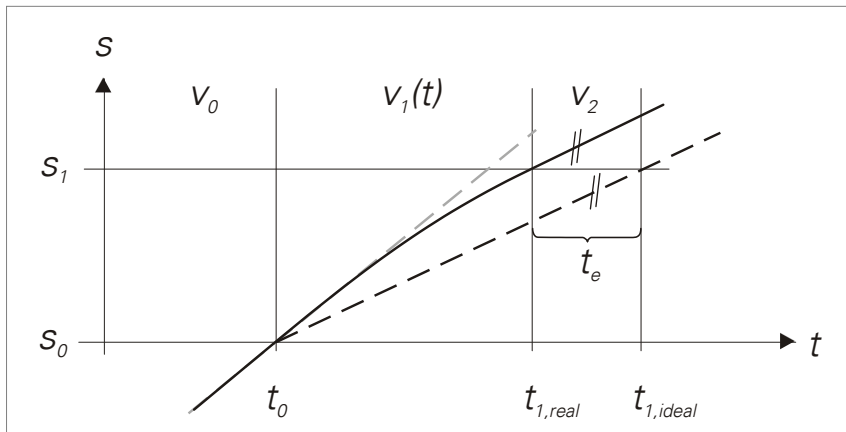
Aus der vorhergehenden detaillierten Betrachtung zum Verbesserungspotential resultiert der in **Abbildung 4-3** gezeigte Programmablaufplan (PAP). Er dient zur Veranschaulichung der Strategieauswahl bei der Annäherung an die LSA.



**Abbildung 4-3:** Programmablaufplan (PAP) des erweiterten Algorithmus (nach DIN 66001)

### Berücksichtigung der Einsprunzeit

Neben der Berücksichtigung der Reaktionszeit des Fahrers ist bei der Auswahl einer Geschwindigkeit die sogenannte Einsprunzeit  $t_e$  von Bedeutung. Diese entsteht bei der Änderung der aktuellen Geschwindigkeit auf ein niedrigeres bzw. ein höheres Niveau (siehe hierzu **Abbildung 4-4**). Da die Änderung nicht sprunghaft erfolgen kann, entsteht eine zeitliche Differenz bei der Ankunft an der Haltelinie. Bei einer Geschwindigkeitsverringerung erhält man einen Zeitvorteil, den sogenannten Einsprunzeitgewinn. Hingegen entsteht bei der Erhöhung der Geschwindigkeit ein Zeitnachteil, dieser wird Einsprunzeitverlust genannt.



**Abbildung 4-4:** Darstellung der Einsprunzeit bei Geschwindigkeitsverringerung

Wird das Fahrzeug gleichmäßig mit  $a < 0$  von  $v_0$  auf  $v_1$  verzögert, legt es während der Zeit  $t_{01} = t_1 - t_0$  den Weg  $s_{01} = s_1 - s_0$  zurück. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$s_1 = \int_{t_0}^{t_1} v_1 dt. \quad (4.10)$$

$$v_1 = \int_{t_0}^{t_1} a_1 dt \quad (4.11)$$

mit  $t_0 = 0$  folgt daraus:

$$s_1 = \frac{a_1}{2} t_{1,real}^2 + v_0 t_{1,real} \quad (4.12)$$

$$v_1 = a_1 t_{1,real} + v_0 \quad (4.13)$$

$$t_{1,real} = \frac{v_1 - v_0}{a_1} \quad (4.14)$$

Für ein idealisiertes Geschwindigkeitsprofil (sprunghafte Änderung von  $v$ ) ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$s_1 = v_1 t_{1,ideal} \quad (4.15)$$

$$s_1 = v_1 (t_{1,real} + t_e) \quad (4.16)$$

Die Gleichsetzung von (4.12) und (4.16) und Auflösung nach  $t_e$  ergibt

$$t_e = -\frac{(v_0 - v_1)^2}{2a_1 v_1} \quad (4.17)$$

Mit der erhaltenen Formel lässt sich der Zeitgewinn bei einer Verzögerung bestimmen und im kann im Algorithmus berücksichtigt werden.

## 4.8 ZUSAMMENFASSUNG DER OPTIMIERUNG

Wie die Untersuchung zeigt, ist bei Einhaltung des Akzeptanzkriteriums (Begrenzung der Reichweite bei  $v_{thu} = konst$ ) eine deutliche Steigerung des Entscheidungshorizontes erreichbar. Somit steht ein längerer Zeitbereich zur Verfügung, in dem ein Passieren der Haltelinie möglich wird.

Weiterhin werden Fahrzeuge, welche sich zwischen der Haltelinie und dem eigenen Fahrzeug befinden, bei der Annäherung und der Strategieauswahl berücksichtigt. Dies geschieht mit Hilfe der neu eingeführten Größen  $t_{FBI,eff}$  und  $s_{LSA,virt}$ . Eine optimale Strategiewahl wird nun sowohl ohne, als auch mit dem Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer gewährleistet.

Für Anfragen des ÖPNV wurde ermittelt, dass keine allgemeingültigen Aussagen über die Eignung der Assistenzfunktion gegeben werden können. Die Bevorrechtigungen durch den ÖPNV sind kreuzungsspezifisch. Lediglich bei Kreuzungen mit Festzeitsteuerung lassen sich über längere Zeit verbindliche Aussagen über die Restlaufzeiten der Signalphasen treffen, da diese keine Bevorrechtigungen ermöglichen.

Neben den Erweiterungen des Algorithmus sind zahlreiche Änderungen der Hardware erkennbar. Anstelle des Mikrocontrollers kommt im Fahrzeug ein PC zum Einsatz. Aufgrund der Möglichkeit einer Datenaufzeichnung sind gute Voraussetzungen für praktische Versuchsreihen gegeben.

## 5 SIMULATIVE UNTERSUCHUNG

Das Einsparpotential des erweiterten FAS lässt sich unter realen Bedingungen, aufgrund der nur bedingten Reproduzierbarkeit, erst bei einer sehr großen Anzahl von Versuchen nachweisen. Aus diesem Grund erfolgt der Vergleich der Fahrprofile eines Fahrzeuges mit FAS (A) und eines Fahrzeuges ohne FAS (B) innerhalb einer Simulation.

Um das Fahrverhalten darzustellen, wird ein Fahrzeugfolgemodell [TRE07] in MATLAB/SIMULINK implementiert. Durch den direkten Vergleich der unterschiedlichen Fahrprofile beider Fahrzeuge werden qualitative Aussagen zum Kraftstoffverbrauch getroffen. Dazu dient ein einfaches Modell [AKC03] zur Verbrauchsabschätzung. Außerdem wird die Verringerung der Haltezahl und Haltezeit von beiden Fahrzeugen untersucht. Schließlich folgt eine Ergebnisdiskussion, welche den Einfluss des FAS nochmals hervorhebt.

### 5.1 LONGITUDINALMODELL - INTELLIGENT DRIVER MODEL – IDM

Um das Fahrverhalten verschiedener Fahrzeuge im Straßenverkehr zu simulieren kommen Fahrermodelle zweier unterschiedlicher Gruppen in Frage. Einerseits sehr realistische und deshalb sehr komplizierte Modelle, welche auf der sogenannten Wenn-Dann-Entscheidungslogik beruhen. Hierzu zählt als Hauptvertreter das Modell nach [WIE74], welches auch in verschiedenen kommerziellen Simulationstools zum Einsatz kommt.

Auf der anderen Seite stehen die einfachen, weniger realistischen Simulationsmodelle. So z.B. das Modell aus [GIP86] und das Intelligent-Driver-Modell [TRE07]. Diese Modelle liefern grundlegende Eigenschaften des Fahrerverhaltens zur Untersuchung des Straßenverkehrs. Mit dem IDM Modell ist ein sehr gutes Abbild des tatsächlichen Fahrverhaltens eines Fahrzeugführers realisierbar, wie in [TRE07] belegt wurde. Deshalb kommt es für die Simulation im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz.

Das IDM ist ein sogenanntes Fahrzeug-Folge-Modell. Der Verkehrszustand zu einem spezifischen Zeitpunkt ist durch die Positionen und die Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrzeuge definiert. Die Entscheidung des Fahrers zur Beschleunigung oder Verzögerung erfolgt allein aufgrund

- der eigenen Fahrgeschwindigkeit  $v$ ,
- des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug  $s$  und
- der Relativgeschwindigkeit  $\Delta v$  zu diesem Fahrzeug (positiv bei Annäherung).

Es ergibt sich der in folgender Formel dargestellte Zusammenhang.

$$\frac{dv}{dt} = a \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left( \frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \quad (5.1)$$



Die Beschleunigung  $dv/dt$  hängt von zwei wesentlichen Komponenten ab. Der Term  $[1 - (v/v_0)^\delta]$  beschreibt die angestrebte Beschleunigung bei ungehinderter Fahrt. Der Einfluss des vorausfahrenden Fahrzeuges auf das Beschleunigungsverhalten wird durch den Ausdruck  $[-(s^*/s)^2]$  berücksichtigt. Beide Terme werden durch die maximale Fahrzeugbeschleunigung  $a$  skaliert. Der minimale Wunschabstand  $s^*$  ergibt sich aus

$$s^* = s_0 + \left( vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right) \tag{5.2}$$

Dieser Formel­ausdruck setzt sich aus

- dem maximalen Beschleunigungsvermögen  $a$  des Fahrzeuges,
- dem maximalen Verzögerungsvermögen  $b$  des Fahrzeuges,
- der momentanen Fahrgeschwindigkeit  $v$ ,
- der Relativgeschwindigkeit  $\Delta v$  zum vorausfahrenden Fahrzeug,
- dem Minimalabstand im Stillstand  $s_0$  (Stoßstange zu Stoßstange) und
- dem zeitlichen Sicherheitsabstand  $T$  zum vorausfahrenden Fahrzeug zusammen.

Das Modell stellt eine realistische Simulation des Fahrerverhaltens bereit und kann an unterschiedliche Fahrzeuge und Fahrer angepasst werden. Dazu können die Parameter variiert werden. LKWs beispielsweise weisen kleine Werte für  $v_0$ ,  $a$  und  $b$  auf. Ein aggressiver Fahrer hingegen wird durch hohe Werte für  $v_0$ ,  $a$  und  $b$  sowie einen kurzen zeitlichen Sicherheitsabstand  $T$  definiert. Verschiedene Werte sind in [ITS06] zu finden. In [TRE04] erfolgt eine Kalibrierung des IDM an den menschlichen Fahrer. **Tabelle 5-1** zeigt die Parameter, die sich daraus für die Simulation in MATLAB/Simulink ergeben.

**Tabelle 5-1:** Parameter des IDM für die Simulation [TRE04]

Parameter	KFZ
Wunschgeschwindigkeit $v_0$	57 km/h
zeitlicher Sicherheitsabstand $T_0$	1,2 s
Minimalabstand zum Vordermann $s_0$	2,0 m
Wunschbeschleunigung $a_{int}$	2,0 m/s <sup>2</sup>
Wunschverzögerung $b_{int}$	1,5 m/s <sup>2</sup>

### Wichtige Kenngrößen für die Simulation

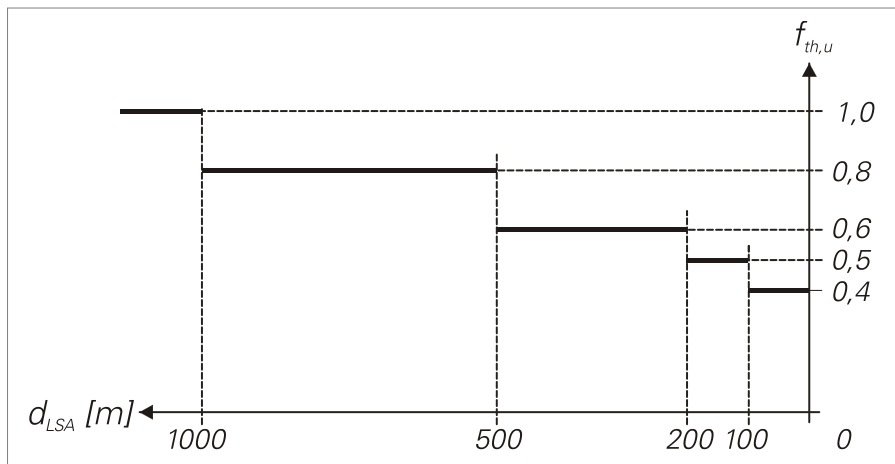
Für die Bestimmung der Zwischenzeit  $t_c$  wurde der Anfahrvorgang des Fahrzeugpulses simuliert und dessen Auswirkung auf ankommende Fahrzeuge untersucht. Dabei wurden folgende Werte für die Zwischenzeit in Abhängigkeit der Pulklänge ermittelt.

**Tabelle 5-2:** Zwischenzeit in Abhängigkeit der Pulklänge

$N_{pulk}$	0	1	2	3	4	5	>5
$t_c$ [s]	0	3.5	3.0	2.7	2.5	2.3	2.1

Die Zwischenzeit wird darum im Algorithmus abhängig von der Pulklänge modelliert. Es kann festgestellt werden, dass der Wert  $t_c$  wie bereits in **Abschnitt 4.4** beschrieben mit zunehmender Anzahl wartender Fahrzeuge konstant wird.

Der Faktor  $f_{thu}$  für die untere Geschwindigkeitsregelgrenze wird im Algorithmus wie in **Abbildung 5-1** gezeigt stufenweise implementiert.



**Abbildung 5-1:** Grafische Darstellung des implementierten Mindestgeschwindigkeitsfaktor

Für Entfernungen  $d_{LSA} > 1000m$  gilt nach Gl. (4.5)  $v_{thu} = v_{zul}$ . Das Minimum des Geschwindigkeitsbeiwertes liegt mit  $f_{thu} = 0.4$  im Bereich  $d_{LSA} < 100m$ .

## 5.2 MODELL ZUR SCHÄTZUNG DES KRAFTSTOFFVERBRAUCHES

Es gibt unterschiedliche Ansätze für die Beurteilung des momentanen Kraftstoffverbrauches eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor. Grundsätzlich ist der Verbrauch motorspezifisch. Eine exakte Bestimmung des Kraftstoffverbrauches eines Verbrennungsmotors im stationären Betrieb kann in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment erfolgen [NAU07]. Dazu wird der tatsächliche Verbrauch in einem motorspezifischen Verbrauchskennfeld abgelesen.

Akelik und Biggs haben in [AKC86] ein Modell entwickelt, das sowohl den Kraftstoffverbrauch als auch die jeweiligen Fahrzeugemissionen simulieren kann. Die Beschleunigung  $a$  und die Fahrgeschwindigkeit  $v$  dienen dem Modell als Eingangsgrößen. Diese Größen können dem IDM entnommen werden, was somit eine relativ unkomplizierte Realisierung ermöglicht. Es erfolgt eine Abschätzung des verbrauchten Kraftstoffes  $\Delta F$  im Zeitintervall  $\Delta t$ . Dieser setzt sich zusammen aus dem Leerlaufverbrauch  $\alpha$ , einem Term für den Verbrauch bei Konstantfahrt und einem Term für den Mehrverbrauch, der bei Beschleunigungsphasen auftritt. Durch die Multiplikation des momentanen Verbrauches mit der innerhalb eines Zeitschrittes verstrichenen Zeit  $\Delta t$  kann der Kraftstoffverbrauch  $\Delta F$  in [ml] angegeben werden.

$$\Delta F = \max \left\{ \left( \alpha + \beta_1 v R_T + \left[ \frac{\beta_2 M_v a^2 v}{1000} \right]_{\alpha > 0} \right), \alpha \right\} \times \Delta t \quad (5.3)$$

Der Anteil des Verbrauchs bei Konstantfahrt setzt sich aus dem Verbrauchsparameter  $\beta_1$ , der Fahrgeschwindigkeit  $v$  sowie der aufzubringenden Gesamtzugkraft  $R_T$  des Motors zusammen. Diese wird durch den Gesamtfahrwiderstand (siehe **Kapitel 2.4**) verursacht. Es folgt der in Gleichung (5.4) dargestellte Zusammenhang.

$$R_T = b_1 + b_2 v^2 + \frac{M_v a}{1000} + g \left( \frac{M_v}{1000} \right) \left( \frac{G}{100} \right). \quad (5.4)$$

Die einzelnen Komponenten des Gesamtfahrwiderstandes sind durch Konstanten angegeben. Die Bedeutung der einzelnen Parameter aus den Gleichungen (5.3) und (5.4) ist in folgender Tabelle aufgeführt.

**Tabelle 5-3:** Definition wichtiger Größen zur Verbrauchsabschätzung

Parameter	Bedeutung
$\alpha$	Leerlaufverbrauch in ml/s
$\beta_1$	Verbrauchsparameter bei Konstantfahrt
$\beta_2$	Verbrauchsparameter bei Beschleunigung ( $a > 0$ )
$a$	momentane Beschleunigung ( $a > 0$ ) / Verzögerung ( $a < 0$ )
$v$	momentane Geschwindigkeit
$M_v$	Gesamtfahrzeugmasse
$R_T$	Gesamtfahrwiderstand
$b_1$	Zugkraftanteil Rollwiderstand
$b_2$	Zugkraftanteil Luftwiderstand
$G$	prozentuale Steigung

Zur Vereinfachung der Simulation wird eine ebene Fahrbahn vorausgesetzt ( $G=0$ ). Aus Gleichung (5.4) folgt deshalb:

$$R_T = b_1 + b_2 v^2 + \frac{M_v a}{1000}. \quad (5.5)$$

Der momentane Kraftstoffverbrauch  $\Delta F$  kann über den gegebenen Zusammenhang rechnerisch ermittelt werden. Die Werte aus [TRE07], welche für die Simulation verwendet werden, sind in **Tabelle 5-4** dargelegt. Bei den Angaben handelt sich um typische Werte eines Mittelklassefahrzeuges mit Verbrennungsmotor.

**Tabelle 5-4:** Parameter für Verbrauchsabschätzung Mittelklassefahrzeug mit Verbrennungsmotor (ITS06)

$\alpha$	$\beta_1$	$\beta_2$	$b_1$	$b_2$	$M_v$
0.444	0.09	0.04	0.333	0.00108	1200

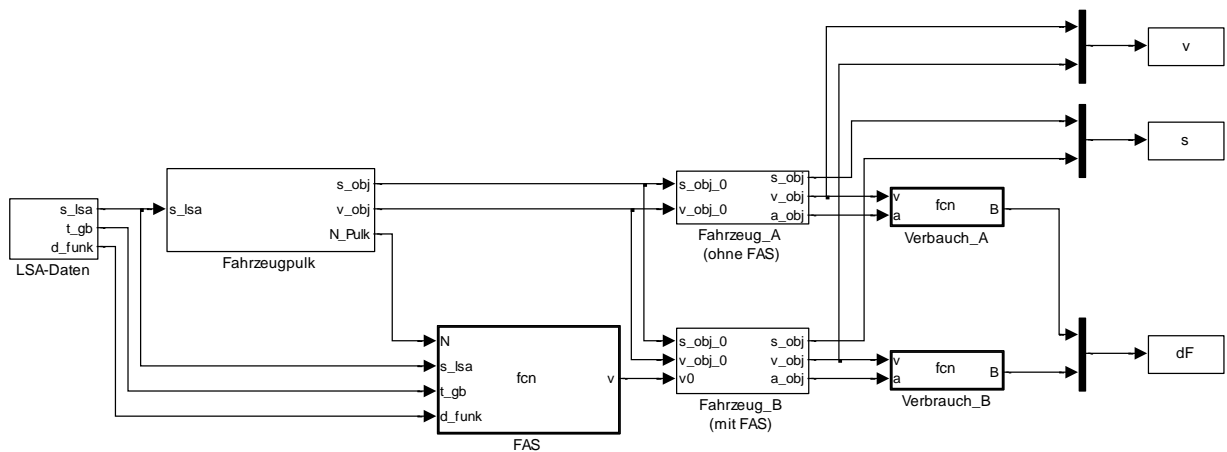
### Stillstandsmanagement

Da es nicht immer möglich ist einen Fahrzeugstillstand zu verhindern, ist ein effektives Stillstandsmanagement im Straßenverkehr von enormer Bedeutung. Wichtig dabei ist der Einfluss einer Motor Start-Stopp Funktion (MSS) auf den Kraftstoffverbrauch. Dieser wird

ebenfalls untersucht. Dafür wird die Annahme getroffen, dass bei einem Bremsvorgang Geschwindigkeiten von  $v \leq 1 \text{ km/h}$  Fahrzeugstillstand bedeuten.

### 5.3 AUFBAU DES SIMULINK-MODELLS

Für die simulative Untersuchung wird in SIMULINK ein Modell erstellt. **Abbildung 5-2** zeigt eine vereinfachte Darstellung des Modells. Dieses ist aus Blöcken aufgebaut, die unterschiedliche Funktionen erfüllen. Die Blöcke können sowohl Eingangs- als auch Ausgangsgrößen besitzen. Funktionale Beziehungen zwischen den Blöcken werden als gerichtete Pfeile dargestellt. Die einzelnen Bestandteile werden in **Tabelle 5-5** genauer erläutert.



**Abbildung 5-2:** Vereinfachte Darstellung des SIMULINK-Modells (siehe Anhang) für die simulative Untersuchung

Der Block *LSA-Daten* liefert die zur Simulation wichtigen Größen der LSA. Für den Fahrzeugpulk dient die Entfernung  $s_{LSA}$  als Eingabe. Die Rote Ampel ist als stehendes, virtuelles Fahrzeug gestaltet, welches beim Signalwechsel „verschwindet“. Das Ende des Fahrzeugpulks wird durch die Ausgangsgrößen  $s_{obj}$  und  $v_{obj}$  beschrieben. Diese bilden jeweils die Eingangsgrößen der Blöcke *Fahrzeuge\_A* und *Fahrzeug\_B*.

**Tabelle 5-5:** Erläuterungen zu den einzelnen Blöcken des Simulationsmodells

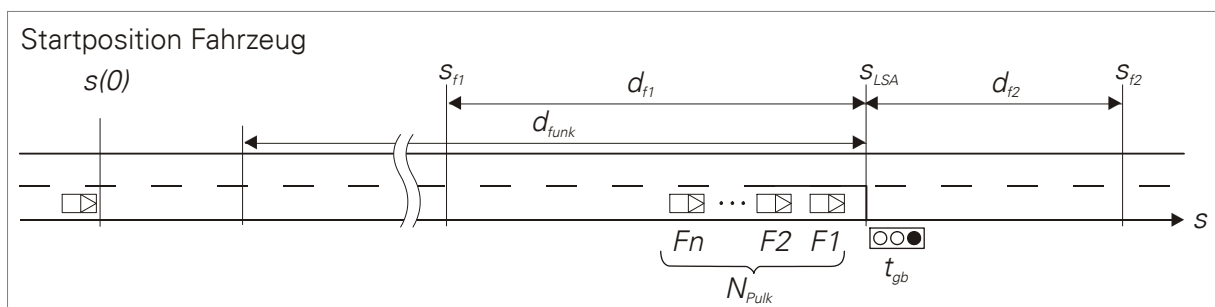
Block	Bedeutung
Verbrauch_A	Block zur Verbrauchsberechnung Fahrzeug A
Verbrauch_B	Block zur Verbrauchsberechnung Fahrzeug B wahlweise mit/ohne Start-Stopp-Funktion
LSA-Daten	Bereitstellung der LSA-Daten
Fahrzeugpulk	Simulation des Fahrverhaltens der Warteschlange
Fahrzeug A	Simulation des Fahrverhalten von Fahrzeug A
Fahrzeug B	Simulation des Fahrverhalten von Fahrzeug B
FAS	Ermittlung und Ausgabe einer Richtgeschwindigkeit für Fahrzeug B
v	Speichern der Geschwindigkeitsprofile der Fahrzeug A und B
s	Speichern der Fahrtrajektorien der Fahrzeuge A und B
dF	Speichern des Verbrauch der Fahrzeuge A und B

*Fahrzeug\_B* erhält zudem eine Geschwindigkeitsvorgabe vom FAS-Block, welcher diese aus den Variablen  $d_{funk}$ ,  $N_{Pulsk}$ ,  $s_{LSA}$ ,  $s_{obj}$  und  $t_{gb}$  ermittelt. Die Berechnung des Kraftstoffverbrauches erfolgt über das Modell aus [AKC86] in den Blöcken *Verbrauch\_A* und *Verbrauch\_B*. Alle für die Auswertung relevanten Daten werden in den MATLAB-Workspace geschrieben, sodass eine Weiterverarbeitung und Visualisierung der Ergebnisse erfolgen kann. Das komplette Modell sowie alle für die Simulation benötigten Funktionen sind auf dem beigefügten Datenträger im Verzeichnis *Simulative Untersuchung* zu finden.

## 5.4 PARAMETERVARIATION UND ERGEBNISSE

Sowohl die Entfernung zur LSA als auch der Beginn der Freigabezeit sind situationsabhängig und demnach im Verlauf einer Fahrt sehr unterschiedlich. Zur Ermittlung von Situationen, an denen der Einfluss das FAS besonders deutlich wird, wurde deshalb eine Parametervariation durchgeführt. Dazu dient das in MATLAB/SIMULINK aufgebaute Modell. Dargestellt ist eine Situation, wie sie im Straßenverkehr häufig vorzufinden ist (**Abbildung 5-3**). Ein Fahrzeug nähert sich mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit einer LSA im Signalisierungszustand „ROT“. Unmittelbar vor dieser befindet sich bereits eine Warteschlange (Fahrzeugpulk), welche beim Signalwechsel anfährt.

Die LSA befindet sich zum Startzeitpunkt der Simulation im Signalisierungszustand ROT. Sowohl der Umschaltzeitpunkt  $t_{gb}$ , als auch die Position der Haltelinie  $s_{LSA}$  und die Pulklänge  $N_{Pulsk}$  werden variiert.



**Abbildung 5-3:** Schema des Simulationsmodells mit Darstellung der Parameter

Zur Variation dienen folgende Parameter:

- Freigabebeginn  $t_{gb}$
- Funkreichweite  $d_{funk}$
- Pulklänge  $N_{Pulsk}$ .

Untersucht werden dabei die Auswirkungen auf folgende Zielgrößen:

- Verbrauchsverbesserung  $\Delta F_d$  im Bereich  $s_{f1} < s < s_{f2}$
- Haltezeit  $t_h$

Die Verbrauchsverbesserung  $\Delta F_d$  ergibt sich aus folgendem Zusammenhang:

$$\Delta F_d = \frac{\Delta F_A - \Delta F_B}{\Delta F_A} \quad (5.6)$$

Der Bereich, in dem die Erfassung des Verbrauchs erfolgt, ist durch die Wegmarken  $s_{f1}$  und  $s_{f2}$  begrenzt.

### 5.4.1 RAHMENBEDINGUNGEN UND VORGABEN

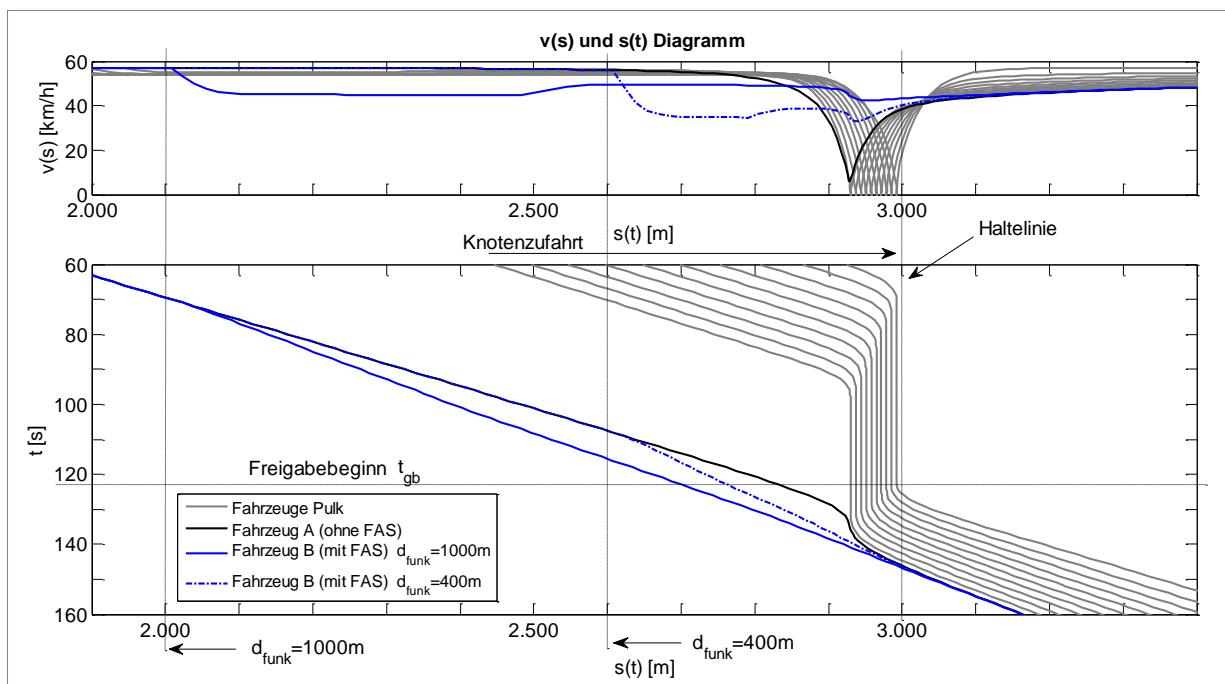
Für die Simulation werden folgende Vorgaben getroffen:

- die LSA befindet sich zu Beginn jeder Variation bei  $s_{LSA} = 3000m$
- beide Fahrzeuge starten bei  $s(t_0) = 0m$ , mit der Richtgeschwindigkeit  $v_0 = 57km/h$
- Anzahl der Fahrzeuge in Warteschlange  $N_{Pulk} \leq 10$
- alle Fahrzeuge besitzen die gleichen Fahrzeugparameter (Tabelle 5-1)
- Fahrermodell reagiert mit leichter Verzögerung auf Geschwindigkeitsvorgaben
- ebene Fahrbahn  $\rightarrow$  keine Steigungswiderstände ( $G = 0$ )
- Start-Stopp-Funktion: für Geschwindigkeiten  $v < 1km/h$  kein Verbrauch ( $\Delta F = 0$ )
- Ermittlung des absoluten Verbrauchs in definiertem Wegabschnitt ( $s_{f1}$  bis  $s_{f2}$ )

Bei der Annäherung an einen Knotenpunkt mit LSA handelt es sich um einen Prozess, der starken Schwankungen unterliegt. Aus diesem Grund lassen sich schwer allgemeingültige Aussagen über das Verbesserungspotential treffen. Jedoch sind Tendenzen erkennbar, welche in der Ergebnisdiskussion dargestellt werden.

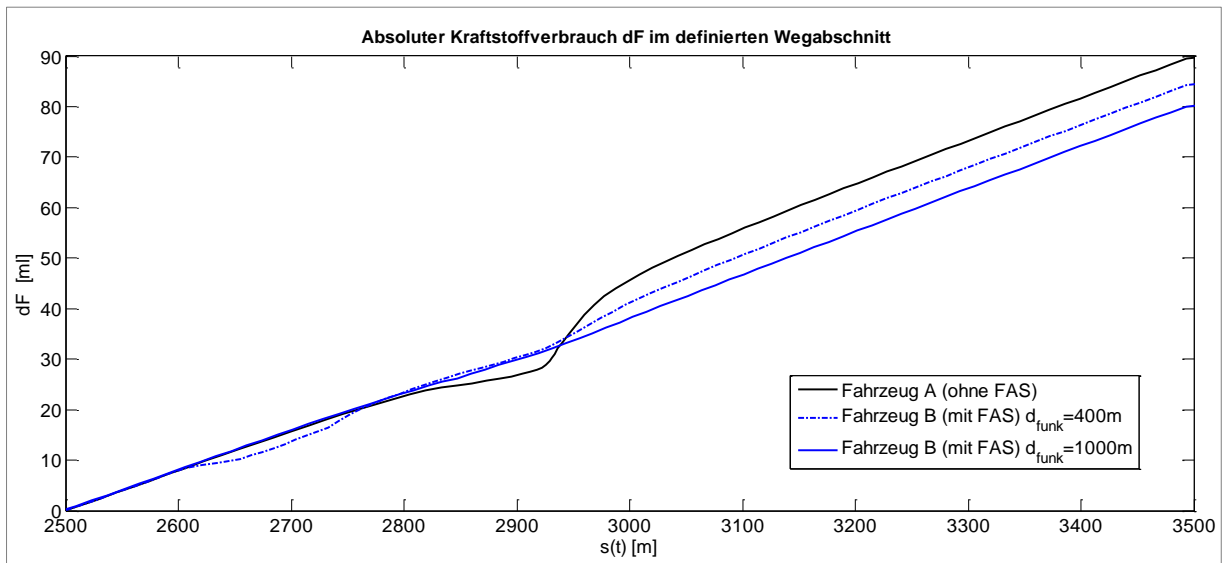
### 5.4.2 EINFLUSS DER FUNKREICHWEITE

Das Zustandekommen des Verbrauchsunterschieds bei der Veränderung der Reichweite wird in **Abbildung 5-4** verdeutlicht.



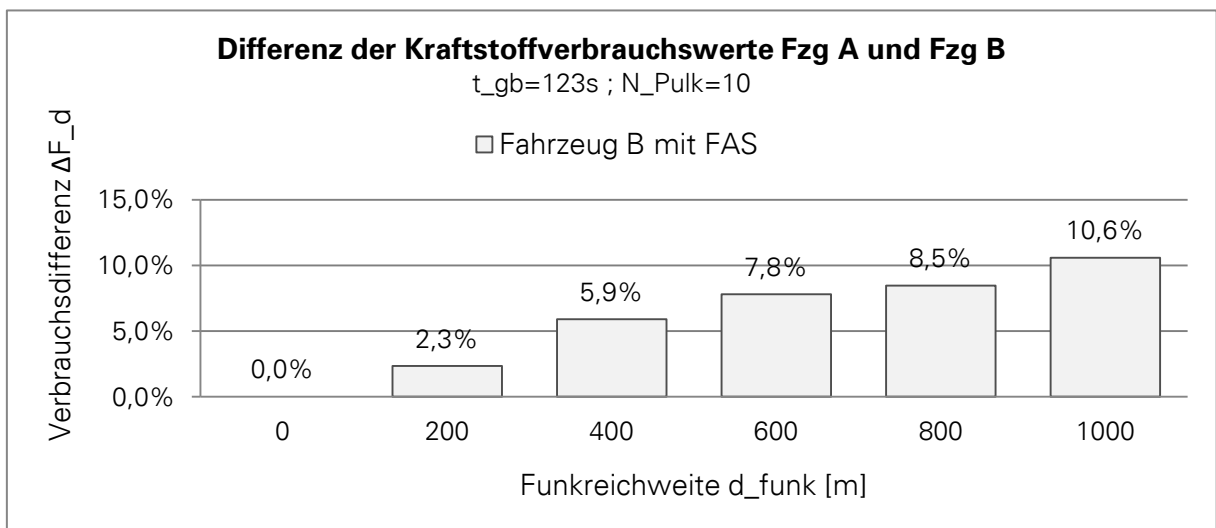
**Abbildung 5-4:** Fahrzeugtrajektorien und Geschwindigkeitsprofile an der Knotenzufahrt – Vergleich Fahrzeug A (ohne FAS) und Fahrzeug B (mit FAS) bei der Annäherung an den Fahrzeugpulk

Für die Situationen  $d_{funk} = 400m$  und  $d_{funk} = 1000m$  wird der Zusammenhang zwischen den Geschwindigkeitsprofilen und dem zurückgelegten Weg gezeigt. Für diese Beispiele zeigt **Abbildung 5-5** die Verläufe des Kraftstoffverbrauches, welche nochmals klar die Unterschiede hervorheben.



**Abbildung 5-5:** Aufaddierter Verbrauch im Wegbereich. Vergleich Fahrzeug A (ohne FAS) und Fahrzeug B (mit FAS) bei der Annäherung an den Fahrzeugpulk – Variation der Funkreichweite

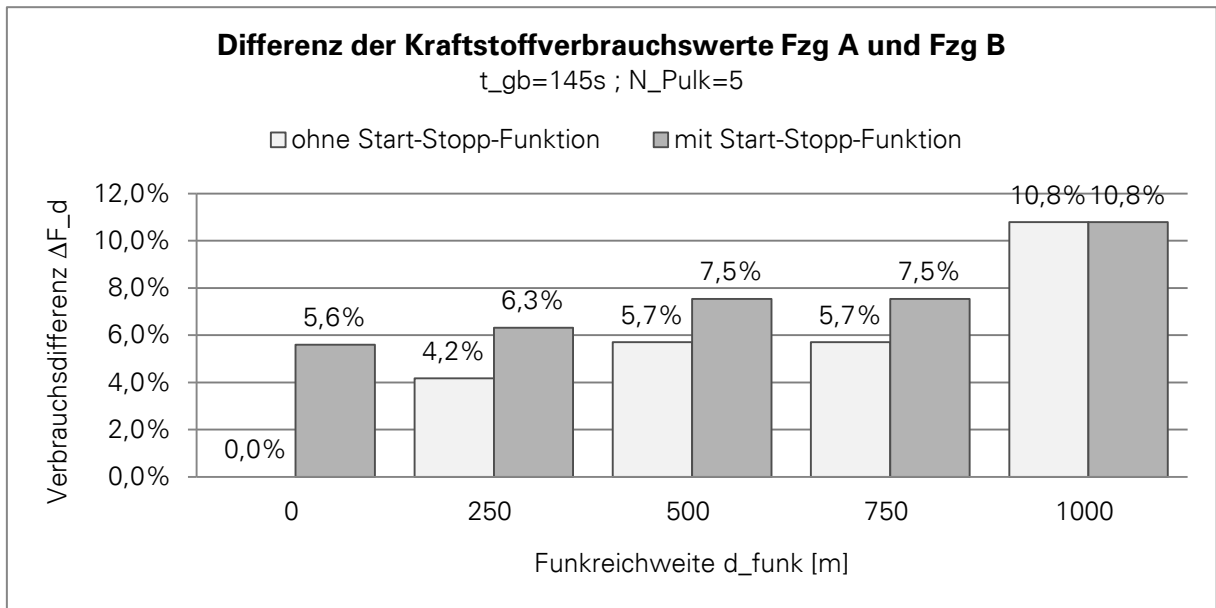
Wie in den Beispielen deutlich wird, kann durch ein frühzeitiges Anpassen der Geschwindigkeit ein Maximum an Kraftstoff eingespart werden. Die Verringerung der Geschwindigkeit auf ein niedrigeres Niveau minimiert den Beschleunigungsvorgang nach dem Passieren der Haltelinie. Dies resultiert in einem deutlichen Verbrauchsunterschied. Abhängig von der Funkreichweite ergeben sich somit unterschiedliche Einspareffekte.



**Abbildung 5-6:** Differenz Kraftstoffverbrauch Fahrzeug A (ohne FAS) im Vergleich zu Fahrzeug B (mit FAS)

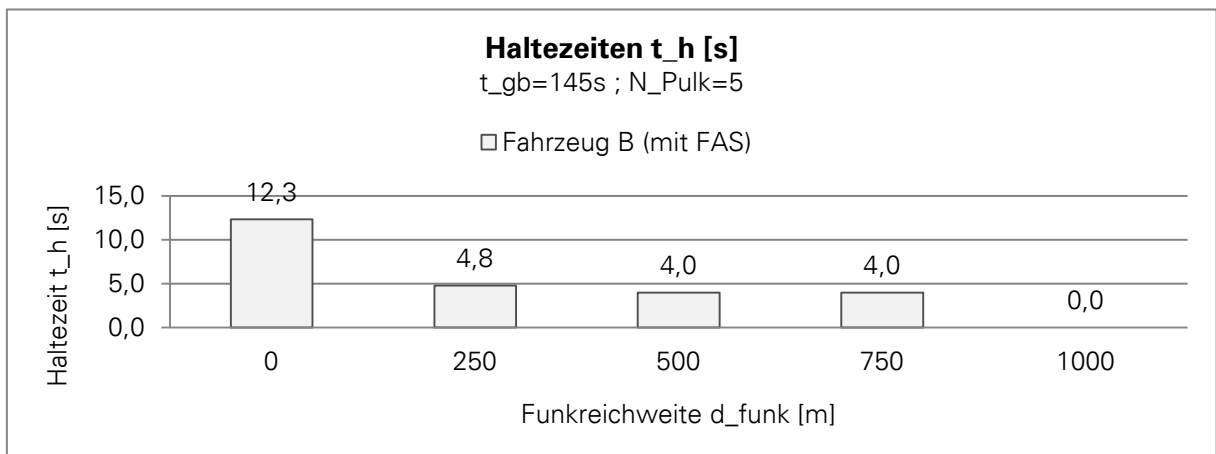
Für die Kraftstoffersparnis in Abhängigkeit der Reichweite  $d_{funk}$  zeigt **Abbildung 5-6** sehr deutlich die Vorteile des Systems. Mit zunehmender Reichweite steigt der eingesparte

Verbrauch stark an. Das Optimum der Verbrauchsverbesserung liegt für die gewählte Situation mit  $\Delta F_d = 10,6\%$  bei  $d_{funk} = 1000m$ .



**Abbildung 5-7:** Verbrauchsdifferenz - Fahrzeug B (mit FAS) – Einfluss einer Start-Stopp-Funktion

Bei weiterer Erhöhung der Reichweite werden keine Steigerungen erzielt, da die untere Regelschwelle der Geschwindigkeit  $v_{thu}$  auf eine Entfernung von  $d_{funk} = 1000m$  begrenzt ist. Grund hierfür ist die Abhängigkeit der konstanten Annäherungsgeschwindigkeit von der Reichweite. Die vorgegebene Fahrgeschwindigkeit sinkt mit abnehmender Reichweite. Aufgrund des längeren Beschleunigungsvorgangs nach dem Passieren der Haltelinie auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit sinkt somit ebenfalls der Einspareffekt.



**Abbildung 5-8:** Haltezeit in Abhängigkeit der Reichweite - Fahrzeug B (mit FAS)

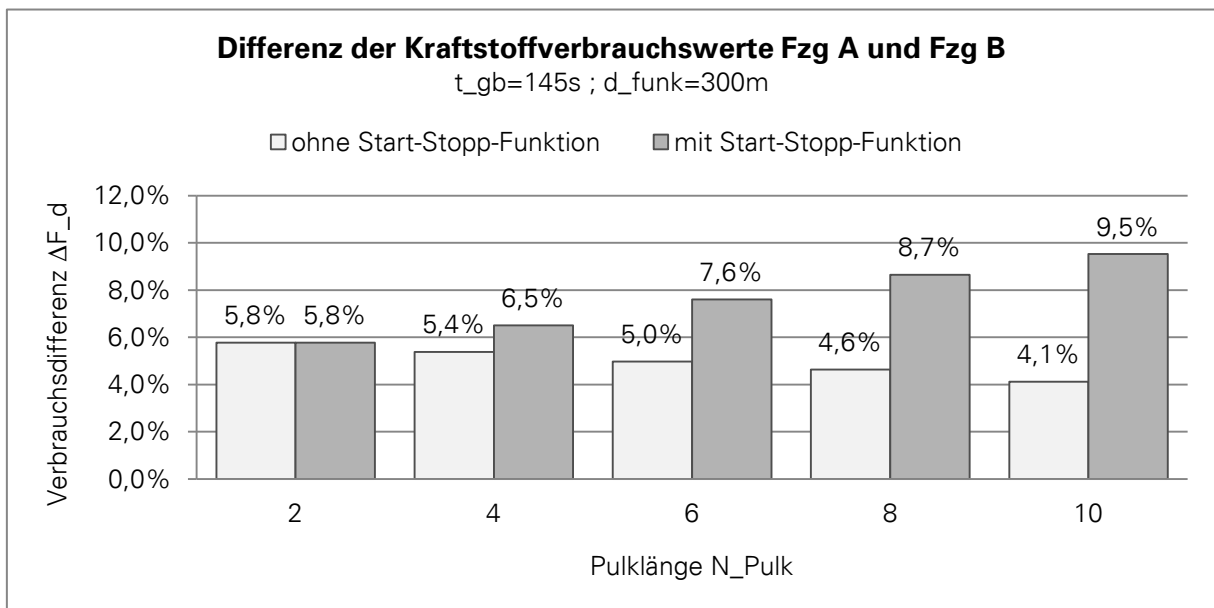
Ein weiteres in **Abbildung 5-7** dargestelltes Beispiel dient zur Veranschaulichung der Nützlichkeit einer Start-Stopp-Funktion (MSS). Der Einspareffekt durch den Einsatz der MSS wird somit bis zur dieser Reichweite  $d_{funk} = 750m$  erkennbar. Ein Fahrzeugstillstand kann hier nicht vermieden werden. Dies wird anhand der Haltezeiten in **Abbildung 5-8** ersichtlich.



Die Verbrauchersparnis ist auf die Kompensation des Leerlaufverbrauchs bei Motorstopp zurückzuführen. Der kurzzeitige Mehrverbrauch beim Startvorgang des Motors fließt nicht in die Berechnung ein. Am Beispiel der gegebenen Situation kann somit der positive Einfluss der Funkreichweite nachgewiesen werden. Dieser wirkt sich auf die Haltezahl und somit direkt auf den Kraftstoffverbrauch aus. Für den Einsatz der Start-Stopp-Funktion wäre somit denkbar, die Annäherungssituation an den prognostizierten Verbrauch anzupassen und das jeweils günstigere Fahrprofil auszuwählen.

### 5.4.3 EINFLUSS DER PULKLÄNGE

In **Abbildung 5-9** wird der Einfluss der Warteschlange auf die Differenz des Kraftstoffverbrauches dargestellt.



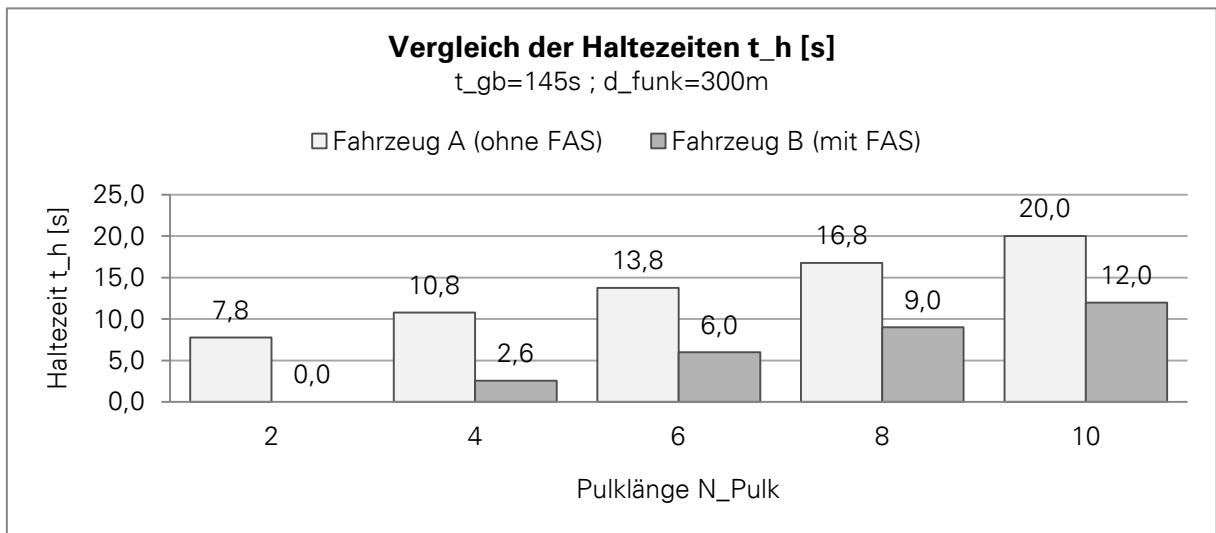
**Abbildung 5-9:** Beispiel für die Verbrauchsdifferenz Fahrzeug A zu B in Abhängigkeit der Pulklänge

Während bei einer Pulklänge von  $N_{Pulk} = 2$  noch 5,8% Kraftstoff eingespart werden, liegt die Einsparung bei einer Warteschlange von 10 PKW lediglich bei 4,1%. Mit steigender Pulklänge sinkt das Einsparpotential.

Die Abbildungen zeigen klar, dass die Warteschlange einen hohen Einfluss auf das System ausübt. Ferner wird gezeigt, dass sich die Implementierung einer Start-Stopp-Funktion positiv auf den Verbrauch auswirkt. So wird durch das Abschalten des Motors bei Fahrzeugstillstand für  $N_{Pulk} = 10$  bereits eine Verbesserung von 4,1% auf 9,5% erzielt.

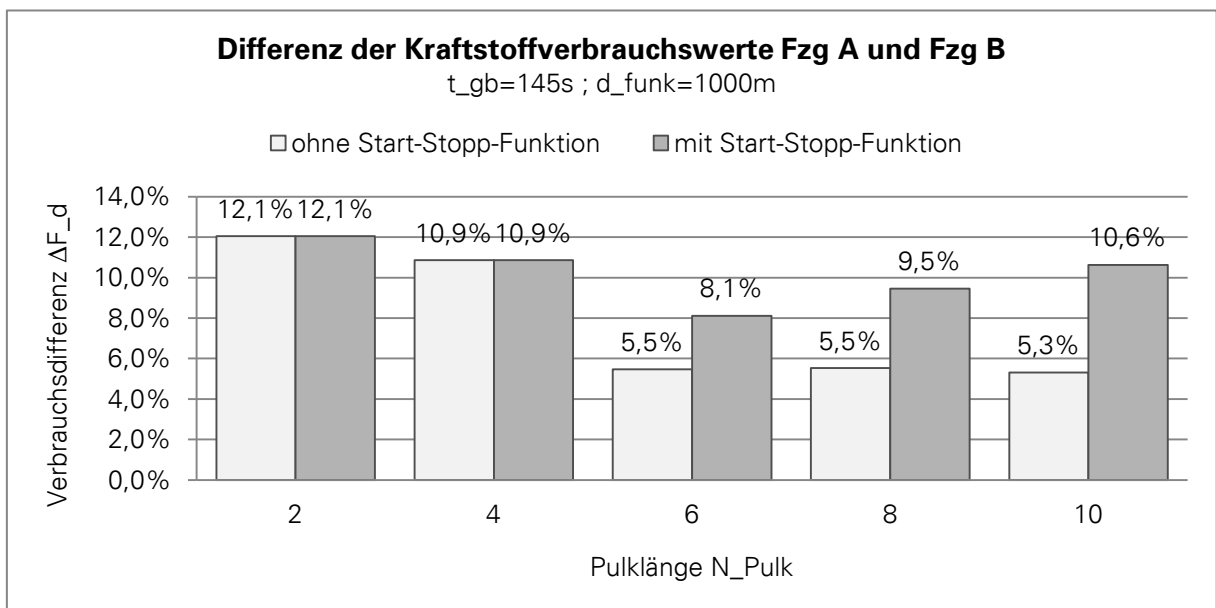
In **Abbildung 5-10** ist die Haltezeit der beiden Fahrzeuge aufgetragen. Die Stillstandszeit steigt proportional zur Pulklänge. Der Fahrzeughalt kann mit FAS bei kleiner Warteschlange ( $N_{Pulk} = 2$ ) noch verhindert werden. Es wird deutlich, dass mit zunehmender Pulklänge  $N_{Pulk}$  ein Fahrzeughalt nicht vermeidbar ist. Dies spiegelt sich ebenfalls im Kraftstoffverbrauch (**Abbildung 5-9**) wieder. Ursache dafür sind die Verschiebung der virtuellen Haltelinie  $d_{LSA, virt}$  sowie die Verzögerung der effektiven Freigabezeit  $t_{FBi, eff}$  und damit die Verkleinerung des Entscheidungshorizontes  $T_{EH}$ .

Durch eine Erhöhung der Reichweite ist diese Tendenz kompensierbar wie **Abbildung 5-11** und **Abbildung 5-12** verdeutlichen.



**Abbildung 5-10:** Vergleich der Haltezeit Fahrzeuge A (ohne FAS) und Fahrzeug B (mit FAS) Variation Pulklänge

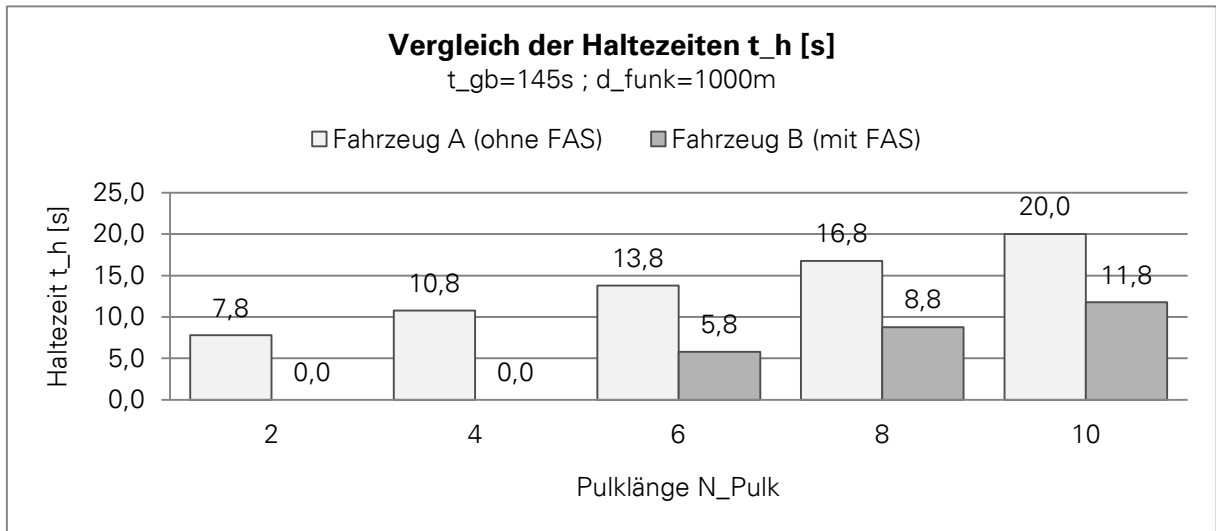
Der Einfluss der Start-Stopp-Funktion auf den Kraftstoffverbrauch steigt proportional mit der Stillstandszeit. Diese kann durch die Steigerung der Reichweite reduziert werden. Für die gewählte Situation ( $t_{gb} = 145s$ ) ist ein Einsparpotential von über 12% möglich, wie **Abbildung 5-11** verdeutlicht.



**Abbildung 5-11:** Haltezeit der Fahrzeuge Variation Pulklänge und Funk

Die dargestellten Zusammenhänge verdeutlichen den Einfluss der Pulklänge auf die Systemfunktion sowie die Potentiale der Funkreichweite und der Start-Stopp-Funktion. Es wird erkennbar, dass die Länge der Warteschlange einen großen Einfluss auf den Verbrauch ausübt. Eine Berücksichtigung dieser ist darum unumgänglich, da es somit möglich ist, die Strategie auf die Anzahl der wartenden Fahrzeuge auszulegen und demnach ein Maximum

an Kraftstoff einzusparen. Ohne die Berücksichtigung der Warteschlange kann dieses Einsparpotential nicht erreicht werden.



**Abbildung 5-12:** Beispiel für die Verbrauchsdifferenz Fahrzeug A zu B in Abhängigkeit der Pulklänge

Befindet sich kein Fahrzeug an der HL ( $N_{Pulk} = 0$ ), so ist die Reduzierung des Verbrauches sehr deutlich. Da sich das Fahrzeug ungehindert, der Haltlinie nähern kann. Außerdem kann es beim Signalwechsel sofort die Haltlinie passieren und auf die Richtgeschwindigkeit beschleunigen.

## 5.5 ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem erarbeiteten Simulationsmodell ist es möglich, verschiedene Annäherungssituationen in einer Knotenzufahrt mit Lichtsignalanlage darzustellen. Die Fahrzeugparameter aller implementierten Fahrzeuge lassen sich auf einfache Weise variieren, sodass eine Vielzahl möglicher Situationen denkbar ist.

Mit Hilfe des Modells ist es möglich, verschiedene Szenarien zu berechnen und auszuwerten. Es konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz eines FAS ein Verbrauchsvorteil erzielbar ist. Die Berücksichtigung der wartenden Fahrzeuge mit deren Anfahrvorgang und die eingesetzten Geschwindigkeitsregelgrenzen bieten großes Potential zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs im Straßenverkehr.

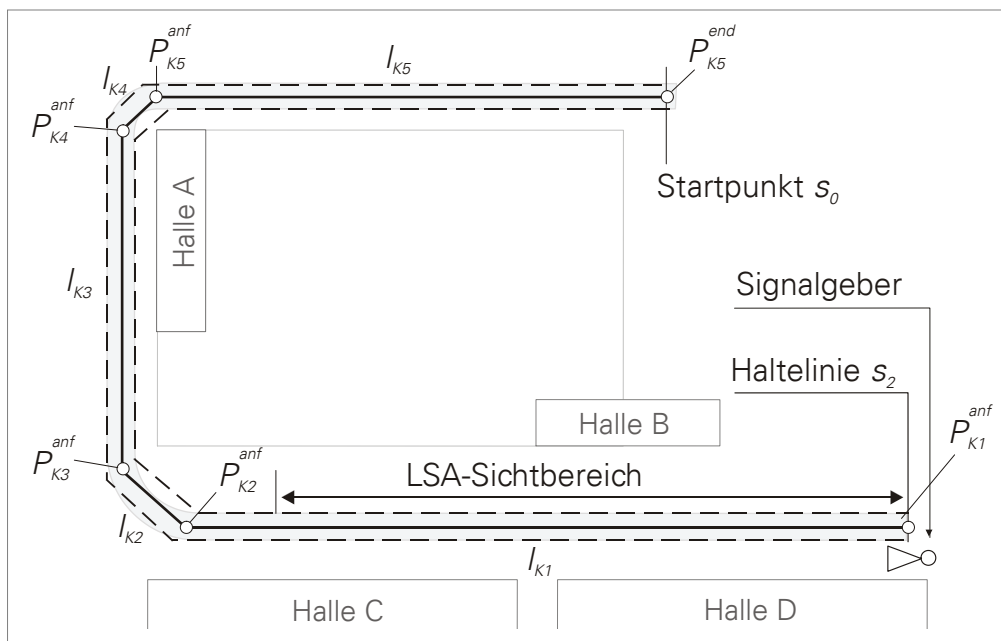
## 6 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Im Rahmen der Arbeit werden praktische Fahrversuche durchgeführt. Dazu wurde der Algorithmus in Matlab Simulink implementiert und eine HMI aufgebaut.

Ziel der Untersuchung ist es das Fahrverhalten und somit die Einhaltung der Strategieempfehlung zu ermitteln um daraus Rückschlüsse auf die Eignung des Systems als rein informierendes FAS zu ziehen.

### 6.1 VERSUCHSAUFBAU

Die Fahrversuche werden an einer Beispielkreuzung auf dem Versuchsgelände des IAD in Dresden Nickern durchgeführt. Eine Übersicht über das Gelände zeigt **Abbildung 6-1**. Die Anfahrstrecke besteht aus fünf Korridorabschnitten. Insgesamt ist diese circa 450 Meter lang. Dadurch ergibt sich ein sehr guter Entscheidungshorizont für die Versuchsfahrten.



**Abbildung 6-1:** Übersicht Versuchsgelände und Anfahrstrecke (Korridorabschnitte) zur LSA

Infolge der eingeschränkten Funkreichweite wurde auf dem PC ein LSA-Modell implementiert. Dieses wird im Bereich der LSA manuell synchronisiert. Somit ist es möglich das FAS unter den gegebenen Bedingungen zu testen.

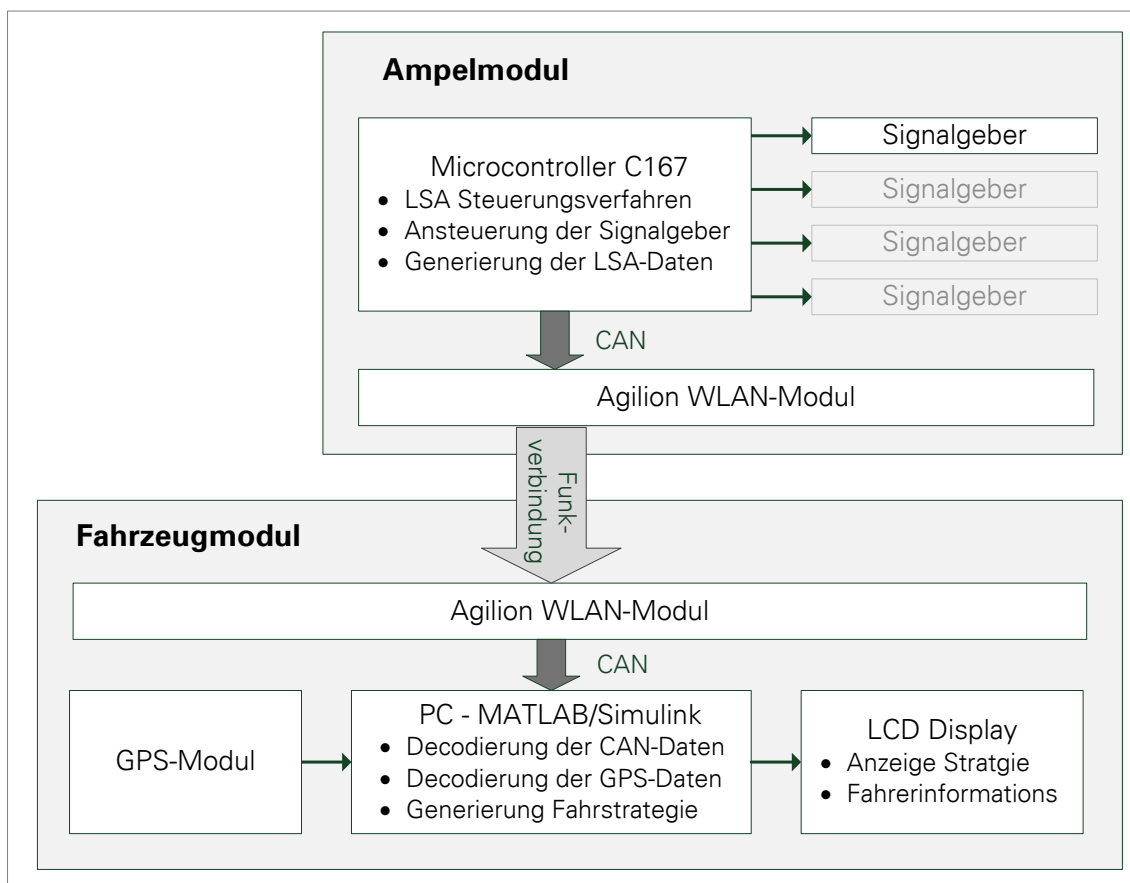
Startpunkt für die Versuche ist der Endpunkt von Korridorabschnitt 5 ( $P_{K5}^{end}$ ). Dadurch steht eine Anfahrstrecke von über 450 Metern zur Verfügung. Aufgrund einer scharfen Linkskurve bei Korridorabschnitt 4, wird die Strecke bis dorthin als Fahrweg genutzt. Der Beginn der Messung erfolgt im Abschnitt 3. Die Sichtweite zur LSA beträgt etwa 150 Meter, d.h. circa

vom Anfangspunkt des Korridors 3 ( $P_{K3}^{anf}$ ). Die GPS-Koordinaten der Korridoranfängspunkte sind in **Tabelle 6-1** dargestellt.

**Tabelle 6-1:** GPS-Koordinaten der Korridoranfängspunkte

Punkt	GPS Koordinaten				
	Latitude [°]	Longitude [°]		Länge [m]	Ausrichtung
$P_{K1}^{anf}$	50.993499	13.795233	$l_{K1}$	174	120°
$P_{K2}^{anf}$	50.994883	13.794089	$l_{K2}$	66	165°
$P_{K3}^{anf}$	50.994570	13.793285	$l_{K3}$	72	210°
$P_{K4}^{anf}$	50.995102	13.793878	$l_{K4}$	13	255°
$P_{K5}^{anf}$	50.995115	13.794058	$l_{K5}$	108	300°
$P_{K5}^{end}$	50.994598	13.795368			

Der aktuelle Systemaufbau, so wie er im Fahrzeug eingesetzt wird, ist in **Abbildung 6-2** dargestellt. Das Ampelmodul ist für den Anschluss von vier Signalgebern vorbereitet. Es wird jedoch nur ein Signalgeber eingesetzt.



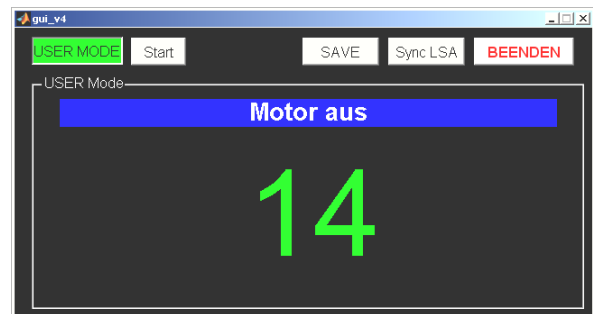
**Abbildung 6-2:** Aufbau und Struktur des Fahrerassistenzsystems für die Versuchsdurchführung

## 6.2 MENSCH MASCHINE SCHNITTSTELLE

Um dem Fahrzeugführer eine Geschwindigkeit vorzuschlagen, ist eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) erforderlich. Auf **Abbildung 6-3** ist die für die praktische Untersuchung verwendete HMI dargestellt. Für Entfernungen unterhalb von 200 Meter zur HL wird dem Fahrzeugführer zur Strategieverfolgung im Display neben der aktuellen Fahrgeschwindigkeit eine Richtgeschwindigkeit angezeigt. Zudem erhält er Informationen welche Strategie im Moment verfolgt wird.



**Abbildung 6-3:** Darstellung des Anzeigekonzeptes (GUI) im Versuchsfahrzeug – oben: Anzeige der aktuellen Strategie; links: aktuelle Fahrgeschwindigkeit; rechts: Richtgeschwindigkeit.



**Abbildung 6-4:** Darstellung des Anzeigekonzeptes (GUI) im Versuchsfahrzeug – oben: Anzeige der aktuellen Strategie; unten: Zeit bis Grünbeginn

Ist ein Fahrzeugstillstand nicht vermeidbar. So wird dem Fahrer bereits wenige Meter vor der Haltelinie die RLZ bis zum Beginn der Freigabephase und ein Hinweis den Motor abzustellen visualisiert (siehe **Abbildung 6-4**).



**Abbildung 6-5:** Sicht aus dem Cockpit des Versuchsfahrzeugs auf LSA und Display (mit HMI)

In **Abbildung 6-5** ist die Sicht aus dem Cockpit des Versuchsfahrzeuges dargestellt. Das Fahrzeug befindet sich unmittelbar vor der Haltelinie. Es ist erkennbar, dass die LSA sich bereits im Signalisierungszustand ROT/GELB befindet. Logischerweise erfolgt deshalb innerhalb kürzester Zeit die Freigabe, sodass rechts auf dem Display die Richtgeschwindigkeit zum Passieren der HL bei GRÜN angezeigt wird.

### 6.3 PROGRAMMSTRUKTUR

Die Programmstruktur und der Ablauf sind in **Abbildung 6-6** erläutert. Nach dem Programmstart werden die Schnittstellen initialisiert. Die serielle Schnittstelle zum GPS-Empfänger wird für die Datenverarbeitung vorbereitet. Es schließt sich die Initialisierung der CAN-Schnittstelle und des verwendeten Vector CAN-CaseXL an. Danach wird das Simulink-Modell CAN gestartet, das die ankommenden CAN-Daten decodiert und für die Auswertung im Hauptprogramm bereitstellt. Nachdem die Timer zur Abfrage des GPS (t\_GPS) und der CAN-Schnittstelle (t\_CAN) deklariert wurden, erfolgt die Initialisierung der GUI. Bevor diese nun manuell durch den Entwickler gestartet werden kann, wird die LSA synchronisiert.

**Tabelle 6-2** zeigt die einzelnen m-Files und deren Bedeutung.

**Tabelle 6-2:** Übersicht über die Matlab-Funktionen und deren Beschreibung (Quelltexte siehe Anhang)

Funktion/m-File	Beschreibung
can_receive.m	Callback-Function des Timers t_CAN <ul style="list-style-type: none"> <li>• Empfang und Dekodierung der CAN-Nachrichten</li> <li>• Speichern der Daten in Array</li> <li>• Aktualisierung der Anzeige</li> </ul>
entfernung_bestimmen.m	Ermittlung der Entfernung von Fahrzeugposition zur LSA
fas_erweitert.m	Ermittlung der Fahrstrategie
get_gps.m	Einlesen und Auswertung des GPS-Datenstromes GPRMC
gps_receive.m	Callback-Function des Timers t_GPS <ul style="list-style-type: none"> <li>• Empfang und Dekodierung der GPS-Daten</li> <li>• Speichern der Daten in Array</li> <li>• Aktualisierung der Anzeige</li> </ul>
gui.m	Hauptprogramm: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Initialisierung aller benötigten Schnittstellen</li> <li>• Variablendeklaration</li> <li>• Start der Timer t_CAN und t_GPS</li> <li>• Öffnen des GUI</li> <li>• Steuerung des Programmablaufes</li> </ul>
lsa_modell.m	Modell der LSA-Festzeitsteuerung

Mit dem Programmstart werden auch die Timer gestartet. Jeder Überlauf erzeugt einen Interrupt, wodurch die jeweilige Callback-Funktion aufgerufen und abgearbeitet wird. Innerhalb dieser werden alle relevanten Daten eingelesen und ausgewertet. Außerdem erfolgt die Aktualisierung der Anzeige, sodass dem Fahrer die entsprechenden Informationen im Display angezeigt werden. Die Quelltexte der m-Files befinden sich im Anhang.

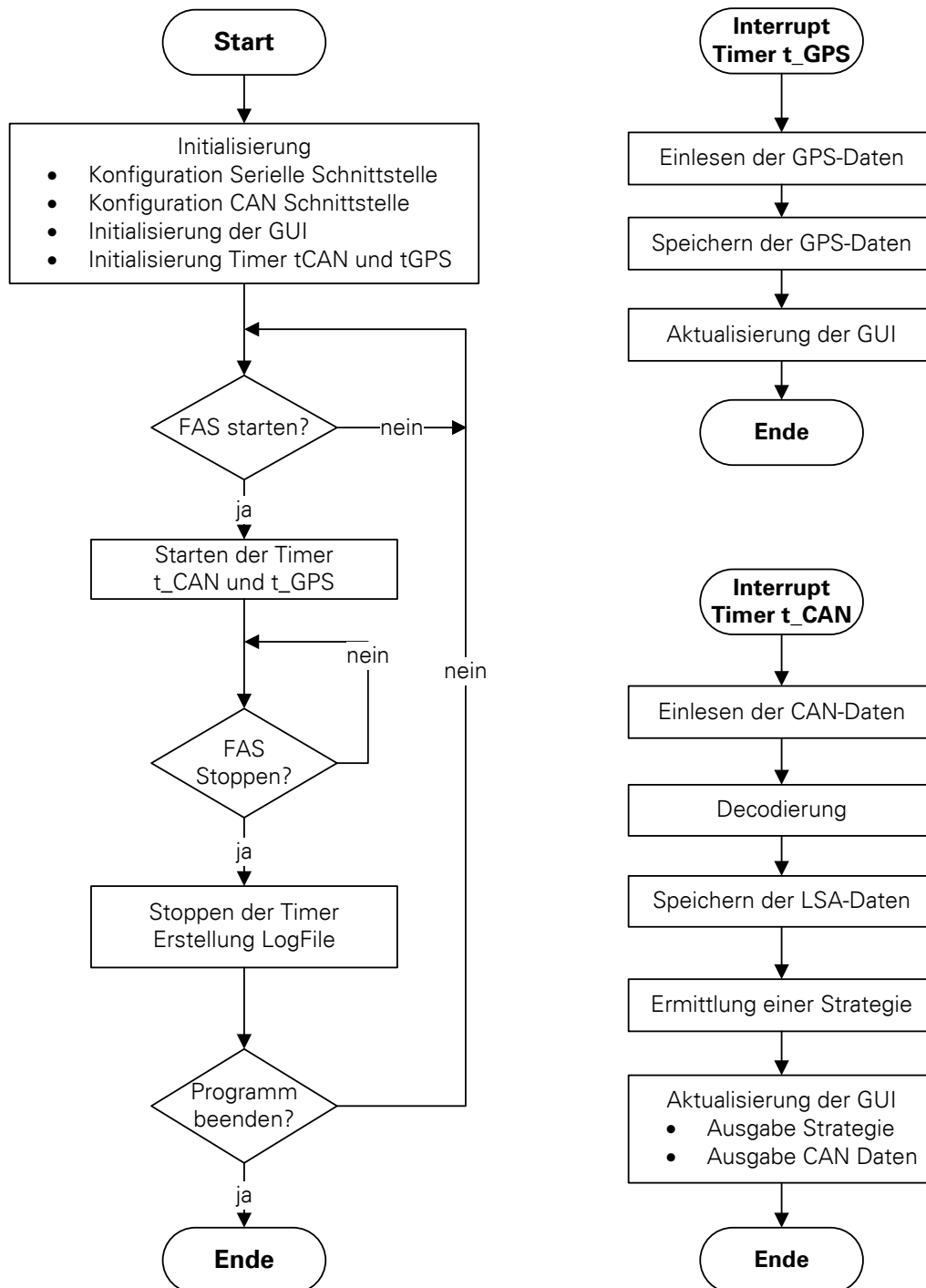


Abbildung 6-6: Programmablaufplan: Hauptprogramm des FAS



## 6.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Um die Vorteile des FAS besonders hervorzuheben werden die ungünstigen Konstellationen untersucht. Dabei handelt es sich um folgende Situationen, die typischerweise im Straßenverkehr ohne das FAS auftreten können:

- **Situation 1:** Die LSA zeigt im Sichtbereich des Fahrzeugführers GRÜN, wechselt jedoch auf ROT, bevor das Fahrzeug die HL erreichen kann.
- **Situation 2:** Die LSA zeigt im Sichtbereich des Fahrzeugführers ROT und wird, unmittelbar nachdem das Fahrzeug zum Stillstand gekommen ist, GRÜN.

Zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit der Versuche wird der Startzeitpunkt jeder Versuchsfahrt so festgelegt, dass jeweils eine der beiden Situationen eintritt. Dieser Startzeitpunkt wird nach folgendem Zusammenhang ermittelt und der Versuchsperson mitgeteilt.

Für die Versuche standen zwei Versuchspersonen zur Verfügung es wurden insgesamt 20 Versuchsfahrten durchgeführt, welche in **Tabelle 6-3** dokumentiert sind.

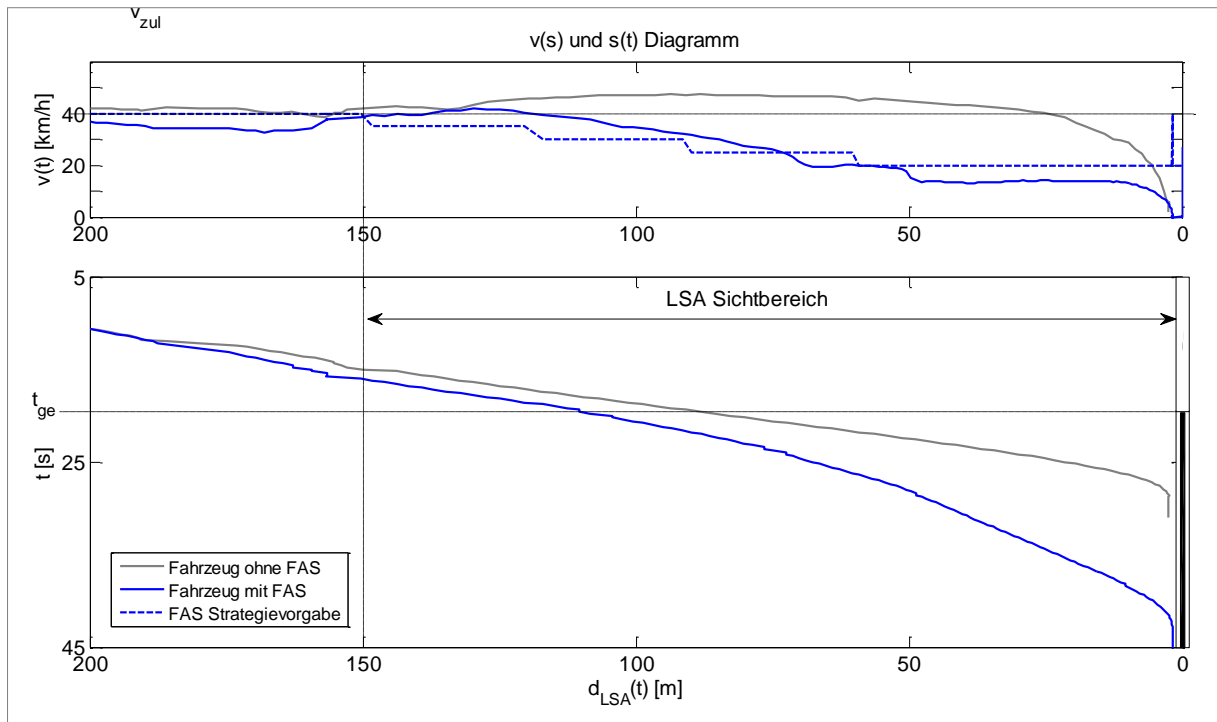
**Tabelle 6-3:** Vergleich konstante und entfernungsabhängige Regelschwelle

VNr:	Dateiname (.mat)	mit/ohne FAS	Situation	Strategie
1	Datalog_11_28_53	ohne FAS	2	keine
2	Datalog_11_53_07	ohne FAS	1	keine
3	Datalog_11_58_56	ohne FAS	1	keine
4	Datalog_12_02_08	ohne FAS	2	keine
5	Datalog_12_05_21	ohne FAS	2	keine
6	Datalog_12_09_41	ohne FAS	2	keine
7	Datalog_12_35_21	ohne FAS	1	keine
8	Datalog_12_38_24	ohne FAS	1	keine
9	Datalog_11_17_05	mit FAS	1	Ausrollen + Stillstand
10	Datalog_11_20_22	mit FAS	2	Stillstandsvermeidung
11	Datalog_11_25_27	mit FAS	1	Ausrollen + Stillstand
12	Datalog_11_27_11	mit FAS	2	Stillstandsvermeidung
13	Datalog_11_48_37	mit FAS	2	Stillstandsvermeidung
14	Datalog_11_55_38	mit FAS	1	Ausrollen + Stillstand
15	Datalog_12_17_02	mit FAS	2	Stillstandsvermeidung
16	Datalog_12_19_20	mit FAS	2	Stillstandsvermeidung
17	Datalog_12_28_11	mit FAS	2	Stillstandsvermeidung
18	Datalog_12_29_30	mit FAS	1	Ausrollen + Stillstand
19	Datalog_12_32_11	mit FAS	1	Ausrollen + Stillstand
20	Datalog_12_40_52	mit FAS	2	Stillstandsvermeidung

Für die Ergebnisdarstellung wurden einzelne Versuche ausgewählt. Zur Verdeutlichung der Strategie mit Stillstand dienen die Versuche 3 und 9. Die Strategie zur Stillstandsvermeidung wurde besonders in den Versuchen 6 und 16 deutlich. Die kompletten Messdaten befinden sich im Anhang (CD).

## 6.5 ERGEBNIS UND ZUSAMMENFASSUNG

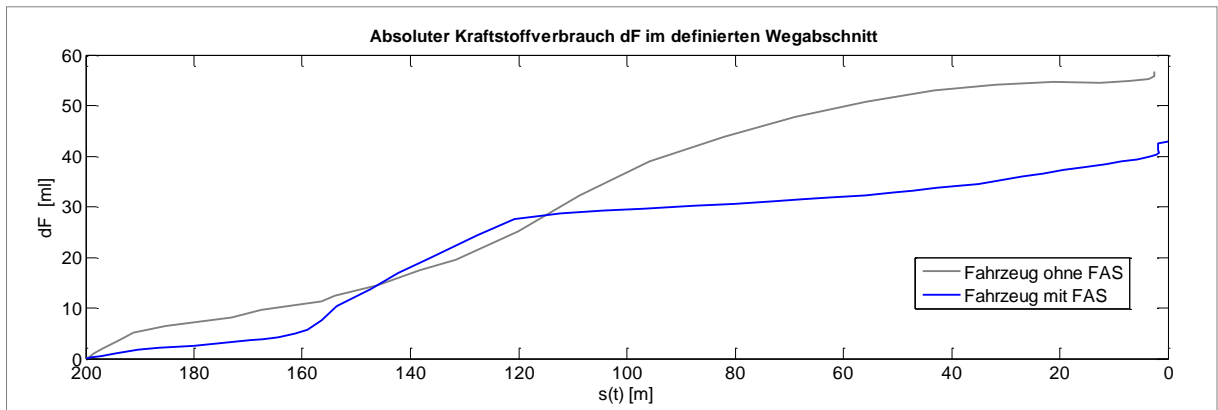
Anhand der markanten Fahrverläufe aus den Versuchen 3 und 9 zeigt **Abbildung 6-7** die Implementierung der Strategie mit Stillstand am Beispiel der Situation 1. Die LSA befindet sich ab einer Entfernung  $d_{LSA} = 150m$  im Sichtbereich des Fahrers. Ohne FAS beschleunigt dieser das Fahrzeug leicht über die zulässige Höchstgeschwindigkeit ( $v_{zul} = 40km/h$ ) um die Haltelinie bei GRÜN zu überfahren.



**Abbildung 6-7:** Fahrzeugtrajektorien und Geschwindigkeitsprofile an der Versuchs Kreuzung: Untersuchung Strategie mit Stillstand – Vergleich Fahrzeug mit FAS und Fahrzeug ohne FAS

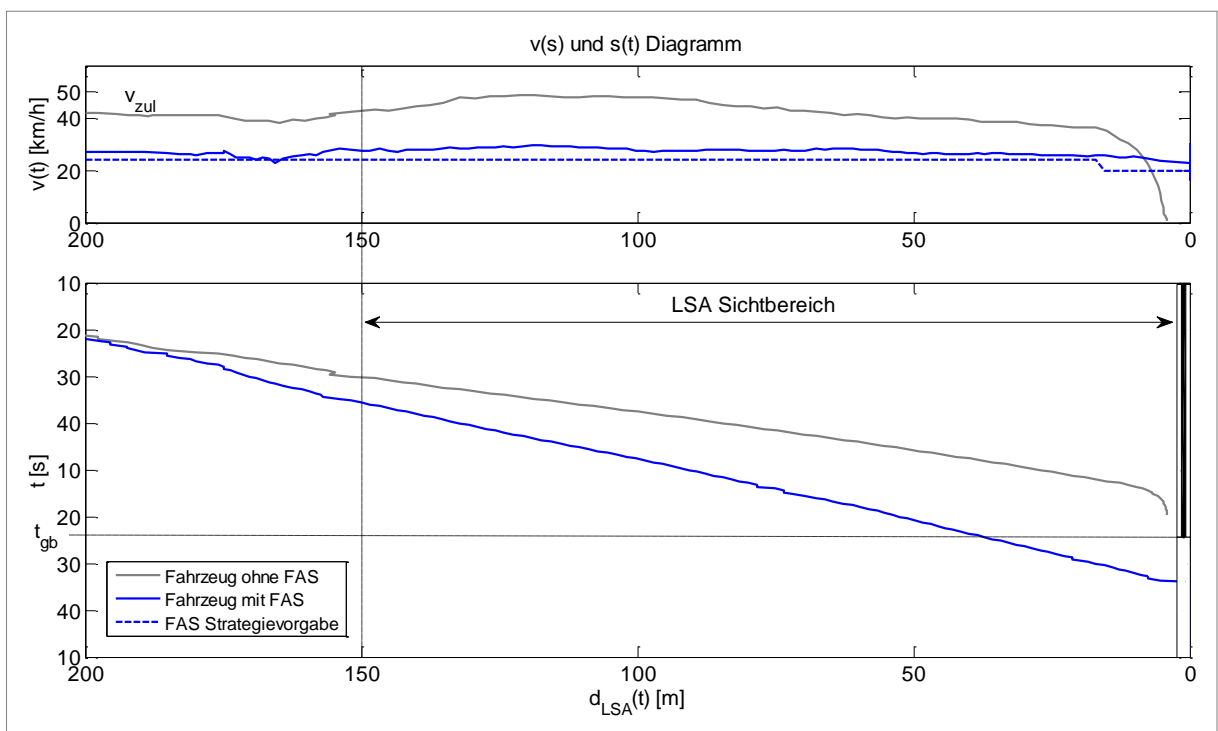
Beim Signalwechsel auf ROT nimmt er den Fuß vom Gas und nähert sich mit hoher Geschwindigkeit der HL, sodass er nach einem starken Bremsvorgang das Fahrzeug zum Stillstand bringt. Für eine ähnliche Situation zeigt die zweite Kurve das Fahrverhalten des gleichen Fahrzeugführers unter Nutzung des FAS. Bereits kurz nachdem die LSA in Sichtweite kommt, wird im Display die Strategie mit Stillstand visualisiert, sodass er bereits frühzeitig den Ausrollvorgang einleiten kann.

Da beide Fahrzeuge zum Stillstand kommen, ist für den zweiten Fall eine deutliche Energieersparnis gegeben (siehe **Abbildung 6-8**). Die dargestellten Verläufe wurden mithilfe der gemessenen Geschwindigkeitsprofile und dem bekannten Modell von [AKC86] im Bereich  $200m < d_{LSA} < 0$  ermittelt. Für die Fahrt ohne FAS ergibt sich ein Verbrauch von  $\Delta F = 57ml$ . Der Verbrauch für die Fahrt mit FAS beträgt hingegen  $\Delta F = 43ml$ . Dies ergibt eine Ersparnis von 24% gegenüber der Fahrt ohne FAS.



**Abbildung 6-8:** Kraftstoffverbrauch: Untersuchung Strategie mit Stillstand – Vergleich Fahrzeug mit FAS und Fahrzeug ohne FAS

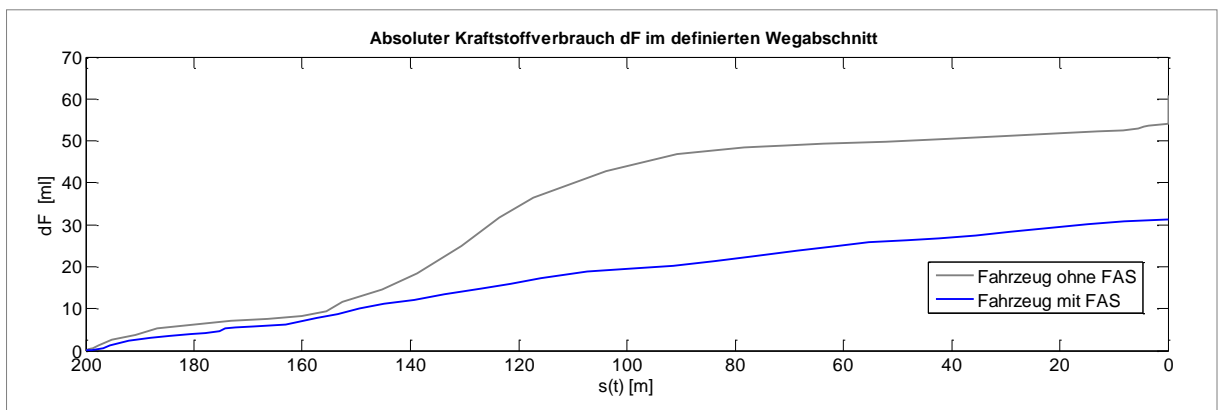
Für Situation 2 ergibt sich mit Hilfe des FAS ebenfalls ein deutlicher Vorteil. Wie in **Abbildung 6-9** erkennbar, nähert sich der Fahrzeugführer im Fall ohne FAS mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit der HL. Durch die fehlende Kenntnis über die RLZ und weil er damit rechnet, dass diese noch während der Annäherung auf GRÜN wechselt, behält er seine Geschwindigkeit bei. Jedoch muss er das Fahrzeug kurz vor dem Signalwechsel stark abbremsen, sodass ein Stillstand nicht vermieden werden kann.



**Abbildung 6-9:** Fahrzeugtrajektorien und Geschwindigkeitsprofile an der Versuchskreuzung: Untersuchung Strategie mit Stillstandsvermeidung – Vergleich Fahrzeug mit FAS und Fahrzeug ohne FAS

Durch die Kenntnis über die RLZ, welche indirekt über das FAS bekannt ist und die Einhaltung der Geschwindigkeitsempfehlung ist dieser Stillstand vermeidbar, was anhand des zweiten Fahrverlaufs deutlich wird. Dadurch ergibt sich eine deutliche Kraftstoffeinsparung,

siehe hierzu **Abbildung 6-10**. Für die Fahrt ohne FAS ergibt sich ein absoluter Verbrauch von  $\Delta F = 54\text{ml}$ . Der Verbrauch mit FAS liegt für Situation 2 mit lediglich  $\Delta F = 31\text{ml}$  deutlich unterhalb der Fahrt ohne FAS. Die Ersparnis beträgt 42%.



**Abbildung 6-10:** Kraftstoffverbrauch: Untersuchung Strategie mit Stillstandsvermeidung – Vergleich Fahrzeug mit FAS und Fahrzeug ohne FAS

Die prozentualen Unterschiede sind nicht mit denen der Simulation vergleichbar, da jeweils unterschiedliche Wegabschnitte bei der Verbrauchsabschätzung betrachtet werden.

Es wurde gezeigt, dass der Einsatz eines FAS deutliche Vorteile bieten kann, solange der Fahrzeugführer die gegebene Empfehlung einhält. Der aufgebaute Versuchsstand und die HMI stellen eine gute Grundlage für weiterführende Untersuchungen dar.

Durch den Einsatz eines PCs im Versuchsfahrzeug sind gute Voraussetzungen für die Durchführung weiterer Versuche geschaffen.

## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein erweiterter Ansatz für eine prädiktive Fahrstrategie auf Basis von Ampel-Fahrzeug-Kommunikationsdaten entwickelt. Ein bestehender Ansatz wurde untersucht um Optimierungsansätze zu verdeutlichen. Dabei konnte gezeigt werden, dass die bisherige Strategieempfehlung durch den Einfluss vorausfahrender Verkehrsteilnehmer eingeschränkt wird. Es ergaben sich potentielle Problemsituationen, welche sich im realen Straßenverkehr negativ auf die Funktionalität eines FAS auswirken.

Die wesentliche Neuerung zu bisheriger Strategieansätze für die Annäherung an Knotenpunkte mit LSA ist die Berücksichtigung anderer Verkehrsteilnehmer. Dazu wurden die neuen Größen effektive Freigabezeit  $t_{Fbi,eff}$  und die virtuelle Position der Haltelinie  $s_{LSA,virt}$  eingeführt, welche die Strategieempfehlung des FAS an die Anzahl wartender Fahrzeuge anpassen. Eine optimale Strategiewahl wird dadurch sowohl ohne, als auch mit dem Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer gewährleistet.

Durch die Verwendung einer entfernungsabhängigen Geschwindigkeitsregelschwelle  $v_{thru}$  ist eine deutliche Steigerung des Entscheidungshorizontes erreichbar. Somit steht ein längerer Zeitbereich zur Verfügung, in dem ein Passieren der Haltelinie möglich wird.

Für Anfragen des ÖPNV wurde ermittelt, dass keine allgemeingültigen Aussagen über die Eignung der Assistenzfunktion gegeben werden können. Die Bevorrechtigungen durch den ÖPNV sind kreuzungsspezifisch. Lediglich bei Kreuzungen mit Festzeitsteuerung lassen sich über längere Zeit verbindliche Aussagen über die Restlaufzeiten der Signalphasen treffen, da diese keine Bevorrechtigungen ermöglichen.

Zur Untersuchung des möglichen Energieeinsparpotentials durch den Einsatz eines FAS ist ein Simulationsmodell in MATLAB/SIMULINK entwickelt worden. Mit diesem kann das Fahrverhalten eines Fahrzeuges mit und ohne FAS verglichen werden. Es ist außerdem möglich verschiedene Situationen bei der Annäherung an eine LSA darzustellen. Es ist es möglich die Funkreichweite, die Freigabezeit und die Anzahl der Fahrzeuge in der Warteschlange zu variieren um den Einfluss auf das FAS zu verdeutlichen.

Durch eine Parametervariation konnte der positive Effekt auf den Kraftstoffverbrauch und die Haltezeit bestätigt werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Ersparnis durch eine Stillstandsvermeidung mit zunehmender Funkreichweite auf bis zu 12% steigen kann. Für Situationen in denen der Fahrzeugstillstand nicht vermeidbar ist kommt der positive Einfluss der Start-Stopp-Funktion auf den Kraftstoffverbrauch zum Tragen.

Das Simulationsmodell stellt eine gute Grundlage für weiterführende Untersuchungen dar und kann an unterschiedliche Situationen angepasst werden. Die Fahrzeugparameter aller implementierten Fahrzeuge lassen sich auf einfache Weise variieren, sodass eine Vielzahl möglicher Situationen denkbar ist.

Für die praktischen Versuche wurde in MATLAB/SIMULINK ein einfacher Algorithmus implementiert. Dieser ermittelt auf Basis der LSA-Daten eine Fahrstrategie. Für Situationen in

denen der Fahrzeugstillstand vermeidbar ist erhält der Fahrzeugführer eine Geschwindigkeitsempfehlung. Ist ein Stillstand nicht vermeidbar, so erfolgt unmittelbar vor der Haltelinie die Ausgabe der Restlaufzeit der Rotphase.

Durch eine Reihe von Fahrversuchen wurde gezeigt, dass ein derartiges FAS deutliche Vorteile bieten kann, solange der Fahrzeugführer die gegebene Empfehlung einhält. Durch den Einsatz eines PCs im Versuchsfahrzeug sind gute Voraussetzungen für die Durchführung weiterer Versuche geschaffen.

Eine praktische Validierung des erweiterten Algorithmus unter Einbeziehung anderer Verkehrsteilnehmern ist in künftigen Versuchen anzustreben. Diesbezüglich kann für die Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer unmittelbar vor der Haltelinie eine Induktionsschleife aufgebaut und im Steuergerät überwacht werden. Damit ist neben der Klassifizierung auch die Ermittlung der Anzahl wartender Fahrzeuge umsetzbar.

Darüber hinaus sind großangelegte Versuchsreihen sinnvoll, was die Verbesserung der Rahmenbedingungen einschließt. Vor allem eine deutliche Erhöhung der Reichweite der Funkverbindung ist wünschenswert und durch den Einsatz des 802.11p-Standards möglich. Für den Einsatz im Straßenverkehr der Zukunft kann bei genügend großer Ausstattungsquote der Verkehrsteilnehmer mit C2X eine deutliche Steigerung der WLAN-Reichweite erreicht werden, da jedes Fahrzeug als Repeater agiert.

In Hinblick auf die Alltagstauglichkeit eines FAS ist das LSA-Steuerungsverfahren von großer Bedeutung. Gegenwärtig wird die LSA der Versuchskreuzung mittels einer Festzeitsteuerung geregelt. Im Straßenverkehr findet sich eine hohe Anzahl von LSA mit verkehrsadaptiven Steuerungsverfahren. Die Implementierung eines derartigen Verfahrens für zukünftige Untersuchungen ist vorstellbar. Dadurch kann ebenfalls der Einfluss von ÖPNV-Anfragen auf die Strategieempfehlung genauer untersucht werden. Weitere Untersuchungen sollten die Strategieauswahl nicht nur auf einzelne, sondern über eine Koordination mehrerer (unmittelbar) hintereinanderliegender Knotenpunkte auslegen. Weiterhin ist es vorstellbar, dass zwischen Fahrzeug und Infrastruktur (LSA) eine bidirektionale Verbindung besteht. Somit ist es vorstellbar, dass zukünftige Steuerungsverfahren auf realen Fahrzeugdaten (Floating Car Data) beruhen.

Das GPS-Signal zur Positionsbestimmung unterliegt deutlichen Schwankungen. Besonders bei Fahrzeugstillstand ergeben sich starke Streuungen um die eigentliche Fahrzeugposition. Eine Kombination der GPS-Daten mit den Daten des CAN-Bus ist daher wünschenswert.

Unter diesem Aspekt ist ebenfalls ein sogenanntes Map-Matching als Alternative zum beschriebenen Korridoransatz denkbar. Dabei erfolgt ein direkter Abgleich der GPS-Position mit Kartendaten, sodass stets eine genaue Lage auch bei Fahrzeugstillstand ermittelbar ist.

Ein mit dem FAS ausgestattetes Fahrzeug kann direkten Einfluss auf den Folgeverkehr haben. Die Nutzung des Systems kann bei anderen Verkehrsteilnehmern ohne FAS zur Provokation von riskanten Überholmanövern führen, falls deren akzeptable Mindestgeschwindigkeit unterschritten wird. Jedoch kann auch eine umweltschonende Fahrweise ermöglicht werden. Dies erweist sich besonders bei niedrigen Ausstattungsquoten als sinnvoll, da ein ausgestattetes Fahrzeug andere Fahrzeuge direkt beeinflussen kann. Weiterge-

hende Untersuchungen in diesem Bereich sind unbedingt notwendig um kooperative Systeme im Straßenverkehr einzusetzen.

Da im Moment die Fahrzeug-zu-Fahrzeug und die Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation durch verschiedene Forschungsprojekte mehr und mehr in der Entwicklung voranschreitet und in absehbarer Zeit erste Systeme die Serienreife erlangen werden, wird sich die Ausstattungsquote dieser Systeme im Straßenverkehr erhöhen, sodass der Ausbau der Infrastruktur sich gut entwickelt und in weiter Zukunft flächendeckend die Übermittlung von RLZ möglich gemacht werden kann.

## A ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Regelkreis Fahrer – Fahrzeug - Verkehr (vgl. [DOR04] S. 16) .....	3
Abbildung 2-2: Grundaufbau der vorausschauenden Fahrstrategie und ([NEU03] S. 86) .....	4
Abbildung 2-3: Klassifizierung der Assistenzfunktion nach Art der Fahrerunterstützung (vgl. [BEN06] S. 4).....	5
Abbildung 2-4: Aufteilung des 5.9 GHz Frequenzbandes (vgl. [LEI08] S. 6) .....	7
Abbildung 2-5: Übersicht über C2X Forschungsaktivitäten in Europa .....	8
Abbildung 2-6: Datenaustausch im KOLINE-System und Funktionsweise (vgl. [KOL10]) .....	9
Abbildung 2-7: Beispiel eines Verbrauchskennfeldes eines Ottomotors mit Direkteinspritzung ([ZEL06]).....	11
Abbildung 2-8: Segmente von GPS (vgl. [MAN04] S. 111) .....	13
Abbildung 2-9: Abgleich der Dead-Reckoning Informationen mit dem GPS ([WAL06] S. 465) .....	15
Abbildung 2-10: Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage .....	18
Abbildung 2-11: Beispiel des Signalzeitenplan für den in Abbildung 2-10 dargestellten Knotenpunkt.....	18
Abbildung 2-12: Prinzip der direkten Umschaltung und der Umschaltung mit Standzeit (vgl. [FGS10] S. 49).....	20
Abbildung 2-13: Prinzip der direkten Umschaltung ohne definierten Umschaltzeitpunkt (vgl. [FGS10] S. 49) .....	21
Abbildung 3-1: Aufbau eines Fahrprofils (Ausgangspunkt SG zeigt „Rot“) bei der Annäherung an eine LSA .....	24
Abbildung 3-2: Prinzipieller Aufbau und Struktur des Fahrerassistenzsystems .....	26
Abbildung 3-3: Signalzeitenplan der Beispielkreuzung auf dem Versuchsgelände .....	26
Abbildung 3-4: Fahrspurkorridor für Zuordnung der Signalgruppe [HAN09] .....	28
Abbildung 3-5: Schematische Darstellung der Fahrsituation (vgl. [HAN09]) .....	30
Abbildung 3-6: Fall A: Abweichung zwischen Ort des Fahrzeugstillstandes und Entfernung zur LSA .....	31
Abbildung 3-7: Fall B: Abweichung vom Zeitpunkt der Überfahrt der HL.....	32



---

Abbildung 3-8: Prinzipieller Aufbau und Struktur des Fahrerassistenzsystems – Ansätze für die Optimierung sind dunkelgrau hervorgehoben – nach EVA Prinzip (Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe) .....	33
Abbildung 4-1: Fahrzeugtrajektorien in einer Signalzufahrt (vgl. [SCH97] S. 214) .....	37
Abbildung 4-2: Vergleich der entfernungsabhängigen mit der konstanten Regelschwelle unter Beachtung des Akzeptanzkriteriums Reichweite .....	40
Abbildung 4-3: Programmablaufplan (PAP) des erweiterten Algorithmus (nach DIN 66001) .....	42
Abbildung 4-4: Darstellung der Einsprunzeit bei Geschwindigkeitsverringerng .....	43
Abbildung 5-1: Grafische Darstellung des implementierten Mindestgeschwindigkeitsfaktor .....	47
Abbildung 5-2: Vereinfachte Darstellung des SIMULINK-Modells (siehe Anhang) für die simulative Untersuchung .....	49
Abbildung 5-3: Schema des Simulationsmodells mit Darstellung der Parameter.....	50
Abbildung 5-4: Fahrzeugtrajektorien und Geschwindigkeitsprofile an der Knotenzufahrt – Vergleich Fahrzeug A (ohne FAS) und Fahrzeug B (mit FAS) bei der Annäherung an den Fahrzeugpulk .....	51
Abbildung 5-5: Aufaddierter Verbrauch im Wegbereich. Vergleich Fahrzeug A (ohne FAS) und Fahrzeug B (mit FAS) bei der Annäherung an den Fahrzeugpulk – Variation der Funkreichweite .....	52
Abbildung 5-6: Differenz Kraftstoffverbrauch Fahrzeug A (ohne FAS) im Vergleich zu Fahrzeug B (mit FAS) .....	52
Abbildung 5-7: Verbrauchsdifferenz - Fahrzeug B (mit FAS) – Einfluss einer Start- Stopp-Funktion .....	53
Abbildung 5-8: Haltezeit in Abhängigkeit der Reichweite - Fahrzeug B (mit FAS) .....	53
Abbildung 5-9: Beispiel für die Verbrauchsdifferenz Fahrzeug A zu B in Abhängigkeit der Pulklänge .....	54
Abbildung 5-10: Vergleich der Haltezeit Fahrzeuge A (ohne FAS) und Fahrzeug B (mit FAS) Variation Pulklänge .....	55
Abbildung 5-11: Haltezeit der Fahrzeuge Variation Pulklänge und Funk.....	55
Abbildung 5-12: Beispiel für die Verbrauchsdifferenz Fahrzeug A zu B in Abhängigkeit der Pulklänge .....	56
Abbildung 6-1: Übersicht Versuchsgelände und Anfahrestrecke (Korridorabschnitte) zur LSA.....	57

---

Abbildung 6-2: Aufbau und Struktur des Fahrerassistenzsystems für die Versuchsdurchführung.....	58
Abbildung 6-3: Darstellung des Anzeigekonzeptes (GUI) im Versuchsfahrzeug – oben: Anzeige der aktuellen Strategie; links: aktuelle Fahrgeschwindigkeit; rechts: Richtgeschwindigkeit. ....	59
Abbildung 6-4: Darstellung des Anzeigekonzeptes (GUI) im Versuchsfahrzeug – oben: Anzeige der aktuellen Strategie; unten: Zeit bis Grünbeginn .....	59
Abbildung 6-5: Sicht aus dem Cockpit des Versuchsfahrzeugs auf LSA und Display (mit HMI) .....	59
Abbildung 6-6: Programmablaufplan: Hauptprogramm des FAS.....	61
Abbildung 6-7: Fahrzeugtrajektorien und Geschwindigkeitsprofile an der Versuchskreuzung: Untersuchung Strategie mit Stillstand – Vergleich Fahrzeug mit FAS und Fahrzeug ohne FAS .....	63
Abbildung 6-8: Kraftstoffverbrauch: Untersuchung Strategie mit Stillstand – Vergleich Fahrzeug mit FAS und Fahrzeug ohne FAS .....	64
Abbildung 6-9: Fahrzeugtrajektorien und Geschwindigkeitsprofile an der Versuchskreuzung: Untersuchung Strategie mit Stillstandsvermeidung – Vergleich Fahrzeug mit FAS und Fahrzeug ohne FAS.....	64
Abbildung 6-10: Kraftstoffverbrauch: Untersuchung Strategie mit Stillstandsvermeidung – Vergleich Fahrzeug mit FAS und Fahrzeug ohne FAS.....	65

## B TABELLENVERZEICHNIS

<b>Tabelle 2-1:</b> Systemfehler des GPS ([MAN04]).....	14
<b>Tabelle 2-2:</b> Definition des GPRMC-Datensatzes NMEA Protokoll .....	16
<b>Tabelle 2-3:</b> Begriffe der Verkehrstechnik ([RIC05] S. 4ff) .....	17
<b>Tabelle 2-4:</b> Übersicht über Steuerungsverfahren ([FGS10] S. 37).....	19
<b>Tabelle 2-5:</b> ÖPNV-beeinflusste Steuerungsverfahren für Einzelknotenpunkte ([FGS93] S.10).....	22
<b>Tabelle 3-1:</b> Wesentliche Fahrvarianten auf Grundlage optisch erfasster Lichtsignale (vgl. [DOR04] S. 69) .....	25
<b>Tabelle 3-2:</b> Aufbau der CAN Botschaft.....	29
<b>Tabelle 3-3:</b> Übersicht über Verbesserungsansätze. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erweiterten Komponenten sind grau hinterlegt. ....	34
<b>Tabelle 4-1:</b> Dreistufiges Ziel- und Entscheidungssystem für die Assistenzstrategie ([DOR04] S.122).....	36
<b>Tabelle 4-2:</b> Vergleich konstante und entfernungsabhängige Regelschwelle .....	39
<b>Tabelle 4-3:</b> Umschaltverfahren und der Einfluss auf den Nutzen der Assistenzfunktion .....	41
<b>Tabelle 5-1:</b> Parameter des IDM für die Simulation [TRE04].....	46
<b>Tabelle 5-2:</b> Zwischenzeit in Abhängigkeit der Pulklänge .....	46
<b>Tabelle 5-3:</b> Definition wichtiger Größen zur Verbrauchsabschätzung .....	48
<b>Tabelle 5-4:</b> Parameter für Verbrauchsabschätzung Mittelklassefahrzeug mit Verbrennungsmotor ([ITS06]) .....	48
<b>Tabelle 5-5:</b> Erläuterungen zu den einzelnen Blöcken des Simulationsmodells .....	49
<b>Tabelle 6-1:</b> GPS-Koordinaten der Korridoranfängspunkte.....	58
<b>Tabelle 6-2:</b> Übersicht über die Matlab-Funktionen und deren Beschreibung (Quelltexte siehe Anhang).....	60
<b>Tabelle 6-3:</b> Vergleich konstante und entfernungsabhängige Regelschwelle .....	62

## C LITERATURVERZEICHNIS

- [AIS10] AISIN AW CO., LTD.: *Products / NAVI-MATIC*. [online (23.05.2010): [http://www.aisin-aw.co.jp/en/02products/01car\\_navi/04navim/index.html](http://www.aisin-aw.co.jp/en/02products/01car_navi/04navim/index.html)]
- [AKC86] Akcelik, R. / Biggs, D.: *An energy-related model of instantaneous fuel consumption*. Traffic Engineering and Control, Vol. 27, 320-325, 1986.
- [AKT10] Projekt aktiv - *Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr*. [online (23.05.2010): <http://www.aktiv-online.org/deutsch/img/AKTIV-Factsheet-D.pdf> S.2]
- [ATZ10] Danisch, R.: *ATZ Online Nachrichten - ESP wird Pflicht*. Artikel, ATZ Online, 17.03.2009, [<http://www.atzonline.de/index.php;do=show/id=9379/alloc=1>]
- [AUD09] AUDI AG: *Technik & Forscher 3*. Geschäftsberichte, Ingolstadt (2009)
- [AUE08] Aue, J.: *Analyse und Entwurf eines Car-2-Infrastructure-Systems für die Anzeige von Ampelsignallaufzeiten*. Studienarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Automobiltechnik Dresden (IAD), Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik, Dresden (2008)
- [BAC05] Back, M.: *Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen*. Schriften des Instituts für Regelungs- und Steuerungssysteme, Univ., Dissertation - Karlsruhe, Univ.-Verl. Karlsruhe (2005), ISBN: 3-86644-031-6
- [BAU04] Bauer, O.: *Planung von Geschwindigkeitsprofilen für automatisch geführte Fahrzeuge*. Fortschritt-Berichte VDI Nr. 585, Reihe 12 – Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf (2004), ISBN: 3-18-358512-X
- [BEC86] Becke, M. / Nackenhorst, U.: *Anfahrbeschleunigungen von Personenwagen*. in: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 5, Mai 1986, S.143-146, Wiesbaden (1986).
- [BEN06] Benmimoun, A.: *Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation für die Kreuzungsassistentz*. Präsentation, Kooperationsforum Fahrerassistenzsysteme, Aschaffenburg (April 2006)
- [BUR09] Burg, H. / Moser, A.: *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*. 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden (2009) – ISBN: 978-3-8348-0546-1

- [DOR04] Dorrer, C.: *Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung telematischer Informationen*. Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart, Band 24, Renningen (2004) – ISBN: 3-8169-2384-4
- [EBE05] Ebersbach, D.: *Entwurfstechnische Grundlagen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit*. Dissertation, TU Dresden, Dresden (2005)
- [FGS10] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA)*. Ausgabe 2010, Köln (2010) – ISBN: 978-3-939715-91-7
- [FGS93] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: *Hinweise zur Bevorrechtigung des öffentlichen Personennahverkehrs bei der Lichtsignalsteuerung*. Ausgabe 1993, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln (1993)
- [GIP86] Gipps, P.G.: *Transportation Research Vol. 20 Part B*, pp. 403–414. (1986)
- [HAN09] Hanisch, F.: *Generierung von Fahrprädiktionsdaten basierend auf einer Ampel-Fahrzeug-Kommunikation*. Studienarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Automobiltechnik Dresden (IAD), Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik, Dresden (2009)
- [INT09] Intersafe Project Presentation – [online 01.06.2010: [http://www.intersafe-2.eu/public/public-documents/deliverables/d1\\_1\\_intersafe-2\\_project\\_presentation\\_v1\\_0.pdf](http://www.intersafe-2.eu/public/public-documents/deliverables/d1_1_intersafe-2_project_presentation_v1_0.pdf)]
- [INV10] INVENT – *Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik*. Forschungsprojekt [online 22.06.2010: <http://www.invent-online.de/de/>]
- [ISE06] Isermann, Rolf: *Fahrdynamik-Regelung – Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik*. 1. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden (2006) – ISBN: 3-8348-0109-7
- [ITS06] Miguel Sánchez, J. / Dongkyun, K.: *Predicting Traffic lights to Improve Urban Traffic Fuel Consumption*. 6th International Conference on ITS Telecommunications Proceedings (2006)
- [JOE08] Joeckel, R. / Stober, M. / Huet, Wolfgang: *Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung*. 5. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg (2008) – ISBN: 978-3-87907-443-3
- [KOL10] Projekt KOLINE: *Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen*. [online (23.05.2010): <http://www.projekt-koline.de/index.php?id=34>]

- [KOW10] Köhne, A. / Wößner M.: *Fehlerquellen bei GPS*. [online (23.05.2010): <http://www.kowoma.de/gps/Fehlerquellen.htm>]
- [KRA02] Krause, R.: *Anfahrbeschleunigungen im alltäglichen Straßenverkehr*. in: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Ausgabe 40/2002, S. 105 – 108. [online (23.02.2010) - <http://www.ureko.de/downloads/veroeffentlichungen/114.pdf>]
- [LAN06] Lange, F.: *Anfahrbeschleunigungen*, Verkehrsrechtsreport – Unfallrekonstruktion, Heft 10/2006, S.377-382, Münster (2006).
- [LEI08] Leinmüller, T. / Schmidt, R. / Böddeker, B. / Berg, R. / Suzuki, T.: *A Global Trend for Car2x Communication*. FISITA 2008 World Automotive Congress, 14.-19. September, München (2008).
- [MAN04] Mansfeld, W.: *Satellitenortung und Navigation. Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. 2. Aufl., Friedrich Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden (2004). ISBN 3-528-16886-2
- [MEN04] Mensebach, W.: *Straßenverkehrsplanung – Straßenverkehrstechnik*. 4. Auflage, Werner Verlag, 2004 – ISBN: 3-8041-4328-8
- [MUE05] Müller, M.: *Ein Beitrag zur Entwicklung von Assistenzsystemen für eine vorausschauende Fahrzeugführung im Straßenverkehr*. Berichte aus der Fahrzeugtechnik, Techn. Univ., Diss.–Kaiserslautern, 2005., Shaker Verlag, Aachen (2005), ISBN: 3-8322-4688-6
- [NAU07] Naunheimer, H. / Bertsche, B. / Lechner, G.: *Fahrzeuggetriebe: Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin (2007), ISBN 3-540-30625-0
- [NEU03] Neunzig, D.: *Fahrerassistenzsysteme zur Verbrauchsminderung von Kraftfahrzeugen*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen (2003) – ISBN: 3-925-194-68-1
- [PRI08] Priemer, C. / Friedrich, B. (2008): *Optimierung von modellierten Warteprozessen im Rahmen adaptiver Netzsteuerungen durch C2I-Daten*. Tagungsband HEUREKA 2008, 5./6. März 2008. Hrsg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln (2008)
- [RIC05] Richter, A.: *Geschwindigkeitsvorgabe an Lichtsignalanlagen*. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden (2005), ISBN: 3-8244-0828-7
- [RIE10] Riegelhuth, G.: *Kooperative Systeme – Sicher und staufrei in die Zukunft*. in: Straßenverkehrstechnik, Ausgabe 4, April 2010, S. 225 – 238

- [SAM01] Samper, K. / Kuhn, K.-P.: *Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch ein vorausschauendes Assistenzsystem*. VDI Berichte Nr. 1613: Der Fahrer im 21. Jahrhundert, S.79-93, (2001), ISBN: 3-18-091613-3
- [SCH08] Schmidt, R. K. / Leinmüller, T. / Böddeker, B.: *V2X Communication*. 17th Aachener Kolloquium 2008, Germany, Oktober 6-8, Aachen (2008).
- [SCH09] Schubert, T.: *Fahradaptive Insassenfixierung mittels Streckenvorausschau*. Studienarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Automobiltechnik Dresden (IAD), Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik, Dresden (2009)
- [SCH10] Schäfer, F. / Basshuysen, R.: *Handbuch Verbrennungsmotoren – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. 5. Auflage, Vieweg & Teubner, Wiesbaden (2010), ISBN: 978-3-8348-0699-4
- [SCH97] Schnabel, W. / Lohse, D.: *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*. 2. Aufl. Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin (1997), ISBN: 3-345-00566-2
- [TRE02] Treiber, M. / Helbig, D.: *Realistische Mikrosimulation von Straßenverkehr mit einem einfachen Modell*. 16. Symposium "Simulationstechnik ASIM 2002", 10.09 -13.09.2002, S. 514–520. Rostock (2002)
- [TRE04] Treiber, M. / Helbig, D.: *Visualisierung der fahrzeugbezogenen und verkehrlichen Dynamik mit und ohne Beeinflussungs-Systeme*. „Simulation and Visualisierung“, 4./5. März 2004, Magdeburg, SCS European Publishing House (2004)
- [TRE07] Treiber, M. / Hennecke, A. / Helbig, D.: *Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations*. Institute of Theoretical Physics, University of Stuttgart (2007).
- [WAL06] Wallentowitz, H. / Reif, K.: *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. 1. Auflage, Vieweg & Sohn, Wiesbaden (2006), ISBN: 978-3-528-03971-4
- [WIE74] Wiedemann, R.: *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Schriftenreihe des IfV Vol. 8, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe (1974).
- [WIL04] Wiltschko, T.: *Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten*. Fortschritt-Berichte VDI Nr. 570, Reihe 12 – Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf (2004), ISBN: 3-18-357012-2
- [WIN09] Winner, H. / Hakuli, S. / Wolf, G.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden (2009), ISBN: 978-3-8348-0287-3

- [ZEL06] Zellbeck H.: *Skriptum Grundlagen Verbrennungsmotoren*. Vorlesungsunterlagen, Technische Universität Dresden Institut für Automobiltechnik. Dresden (2006)



## D ANHANG

### Ordnerstruktur des beiliegenden Datenträgers (CD)

- \ Dokumentation
  - \\ Literatur
  - \\ Poster
  - \\ Schriftliche Ausarbeitung
  - \\ Verteidigung
- \ Simulative Untersuchung
  - \\ Simulink Modell
  - \\ Simulationsergebnisse
- \ Experimentelle Untersuchung
  - \\ Software
  - \\ Messdaten