

# **Emissionsreduktion durch die Entwicklung einer prädiktiven Motorregelung**

Einkopplung neuartiger Informationsquellen und Sensoren in Motorsteuergeräte von  
Kraftfahrzeugen

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 33322/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

VEMAC GmbH & Co. KG

**Prof. Dr.-Ing. Michael Reke**  
Lars Posdena  
Michael Kiausch

RWTH Aachen University

**Prof. Dr.-Ing. Jakob Andert**  
Giovanni Vagnoni  
Markus Eisenbarth

Aachen, Januar 2018

# **Emissionsreduktion durch die Entwicklung einer prädiktiven Motorregelung**

Einkopplung neuartiger Informationsquellen und Sensoren in Motorsteuergeräte von  
Kraftfahrzeugen

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 33322/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

VEMAC GmbH & Co. KG

**Prof. Dr.-Ing. Michael Reke**  
Lars Posdena  
Michael Kiausch

RWTH Aachen University

**Prof. Dr.-Ing. Jakob Andert**  
Giovanni Vagnoni  
Markus Eisenbarth

Aachen, Januar 2018

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Az **33322/01**Referat **21**Fördersumme **124.000,00 EUR**

**Antragstitel** Emissionsreduktion durch die Entwicklung einer prädiktiven Motorregelung – Einkopplung neuartiger Informationsquellen und Sensoren in Motorsteuergeräte von Kraftfahrzeugen

**Stichworte** Nachhaltige Mobilität – Emissionsreduktion – Kraftstoffeinsparung – Prädiktive Regelung – Vernetzte Motorsteuerung – RDE

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>18 Monate</b>	<b>18.04.2016</b>	<b>18.10.2017</b>	<b>1</b>

Zwischenberichte	2 Zwischenberichte:	31.10.2016	30.04.2017
------------------	---------------------	------------	------------

**Bewilligungsempfänger** VEMAC GmbH & Co. KG  
Krantzstr. 7  
52070 Aachen  
Contact@vemac.de  
www.vemac.de

Tel 0241/1829 290  
Fax 0241/1829 299

Projektleitung  
Dr.-Ing. Michael Reke

Bearbeiter

**Kooperationspartner** RWTH Aachen University  
Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen  
Mechatronische Systeme am Verbrennungsmotor IKZ 412330  
Forckenbeckstraße 4  
52074 Aachen

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Ein Hauptgrund für höhere Real-Driving-Emissionen sind die deutlich höheren Dynamikanteile im realen Fahrzeugeinsatz im Gegensatz zu denen in den derzeit verbindlichen Fahrzyklen. Trotz aufwändiger Abgasnachbehandlungssysteme stellt die fehlende Prädiktion des Fahrprofils eine große Herausforderung für die emissionsoptimale Motorregelung dar. Gleichzeitig steigen die Anzahl von Umgebungssensoren und der Grad der Vernetzung des Fahrzeugs mit seiner Umwelt (Car2X) aufgrund von Sicherheits- und Komfortfunktionen zunehmend.

Die Idee des hier beantragten Projekts ist es, die vielfältigen neuen Sensorinformationen und Vernetzungsmöglichkeiten auch dem Motorsteuergerät zur Verfügung zu stellen, um so die Vorteile einer vorausschauenden Motorregelung in Bezug auf Verbrauchs- und Emissionsreduktion zu nutzen

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

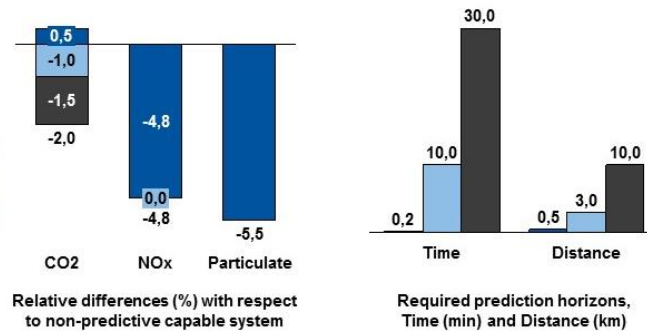
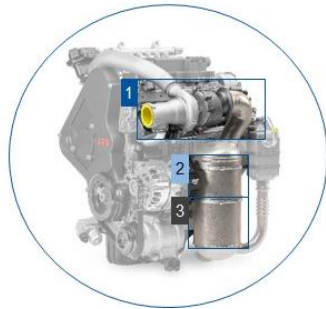
Das hier verfolgte Projekt stellt einen ersten Schritt zur vorwettbewerblichen Potenzialermittlung durch unabhängige Entwickler dar. Gleichzeitig soll ein Werkzeug in Form eines frei programmierbaren Steuergeräts mit zugehöriger Algorithmen-Toolbox geschaffen werden. Hierdurch sollen zum einen die Informationen der unterschiedlichen Domänen Antrieb, Sicherheit und Komfort miteinander verbunden und zum anderen die erweiterten Teile einer nun vernetzten Motorregelung berechnet werden.

Im Ergebnis entstehen so Knowhow und ein Werkzeug für die Entwicklung vernetzter Motorsteuerungs-Algorithmen, welches die Projektpartner in zukünftigen Projekten mit den einzelnen Fahrzeugherstellern, vermarkten können. Für dieses Ziel hat sich mit VEMAC, RWTH und FEV ein optimales Konsortium gefunden, was die notwendigen Hardware- und Softwareteile erstellen kann, diese mit den erforderlichen, theoretisch fundierten Regelungen zum Einsatz bringen kann und darüber hinaus durch eine weltweite Präsenz in die breite Anwendung bei Zulieferern, Forschungseinrichtungen bis hin zu Fahrzeugherstellern tragen kann.

## Ergebnisse und Diskussion

Die Simulationsergebnisse zeigen ein deutliches Verbesserungspotenzial der Emissionswerte und des Kraftstoffverbrauchs während dem transientem Betrieb und in RDE-Testzyklen:

- 1. Air Path (Turbocharger)
- 2. Lean NO<sub>x</sub> Trap (LNT)
- 3. Diesel Particulate Filter (DPF)



Zur Verdeutlichung des Verbesserungspotenzials wird nachfolgend eine Beispielrechnung durchgeführt: Ein durchschnittliches europäisches Dieselfahrzeug fährt ca. 13 000 km im Jahr und emittiert dabei ca. 0,49 g/km NO<sub>x</sub>. Bei ca. 5,6 Mio. neu zugelassen Dieselfahrzeugen (Hubraumklasse 1,4 – 2,0l) im Jahr 2015 ergibt dies ca. 36 000 Tonnen Gesamtemissionen NO<sub>x</sub> pro Jahr. Mit der im Projekt entwickelten Technologie könnten somit ca. 2 000 Tonnen NO<sub>x</sub> eingespart werden, was den NO<sub>x</sub>-Emissionen von 130 000 Dieselfahrzeugen entspricht. Darüber hinaus können 0,3 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden.

## Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- „Predictive Diesel Engine Control Strategies by Means of Car2X based Driving Information“, Symposium for Combustion Control, 2017
- „The Predictive Powertrain: how the combustion engine can benefit from V2X communication“, SAECCCE Shanghai, 2017
- „NET-ECU: Connected Engine Control“, VKA Jahresbericht, 2017
- Fahrdemonstration auf dem 25. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2017
- Eingereichte Veröffentlichungen:  
„Predictive Diesel Engine Control Strategies by Means of Car2X based Driving Information“, International Journal of Engine Research: SAGE Journals, 2018

## Fazit

Das Projekt hat gezeigt, dass ein großes Potenzial für prädiktive Motorregelalgorithmen zur Reduktion der Schadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs besteht. Im Rahmen des Projekts wurde ein Werkzeug entwickelt, welches in weiterführenden Forschungsprojekten zur Hebung der aufgezeigten Potenziale eingesetzt werden kann.

## Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	1
2	Einleitung .....	2
3	Hauptteil.....	4
3.1	Konzept und Spezifikation .....	4
3.1.1	Softwareschnittstelle zwischen Applikation und Basissoftware .....	5
3.1.2	Regelstrategien zur Reduzierung der Schadstoffemissionen.....	6
3.2	Simulative Potenzialanalyse zur Emissionsreduktion.....	8
3.2.1	Einführung.....	8
3.2.2	Randbedingungen und Simulationsergebnisse .....	8
3.2.3	Kurzer Prädiktionshorizont – Luftpfad .....	9
3.2.4	Mittlerer Prädiktionshorizont – NO <sub>x</sub> Speicher Katalysator (NSK) .....	11
3.2.5	Großer Prädiktionshorizont – Dieselpartikelfilter (DPF).....	15
3.2.6	Zusammenfassung und Fazit .....	18
3.3	Entwicklung und Aufbau der elektronischen Hardwarekomponenten.....	19
3.3.1	CPU Modul.....	19
3.3.2	GPS-Empfänger und Beschleunigungssensor .....	20
3.3.3	Car2X Hardware .....	20
3.3.4	Bordnetztaugliche Spannungsversorgung.....	21
3.3.5	Hardwareaufbau.....	22
3.4	OCT Basissoftware .....	25
3.4.1	Betriebssystem.....	25
3.4.2	Erweiterung der Basissoftware mit den XCP/CCP Protokollen .....	25
3.4.3	Integration der neuen Hardwarekomponenten .....	25
3.4.4	Simulink/OCT-Schnittstelle.....	27
3.4.5	Simulink-Bibliothek.....	28
3.4.6	Simulink Bibliothek für die Car2x Schnittstelle .....	31
3.5	Entwicklung der Algorithmen zur prädiktiven Motorregelung.....	32
3.5.1	Überblick Regelungsmodell.....	32
3.5.2	Prädiktion der Fahrzeuggeschwindigkeit.....	32
3.5.3	Prädiktiver Regelalgorithmus für den Luftpfad .....	34
3.6	Demonstrator.....	40
4	Fazit.....	42
5	Literaturverzeichnis.....	43

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Aufbau und Schnittstellen des OCT Systems .....	5
Abbildung 3-2: Untersuchte Prädiktionshorizonte mit Zuweisung der Teilsysteme.....	8
Abbildung 3-3: Aufbau des verwendeten Simulationmodells für Dieselmotoren.....	9
Abbildung 3-4: Vergleich zwischen konventioneller und prädiktiver Regelung .....	11
Abbildung 3-5: WLTC Ergebnisse für verschiedene Prädiktionen .....	11
Abbildung 3-7: Darstellung Zeitfenster für mögliche DeNO <sub>x</sub> Events.....	13
Abbildung 3-8: Beispielresultat eines repräsentativen RDE-Zyklus .....	14
Abbildung 3-9: Kraftstoffmehrverbrauch und DeNO <sub>x</sub> -Effizienz .....	14
Abbildung 3-10: Vorlaufzeit und Prädiktionshorizont für DeNO <sub>x</sub> Event .....	15
Abbildung 3-13: Vergleich zwischen konventioneller und prädiktiver Regelung für eine festgelegte RDE Route .....	17
Abbildung 3-14: Einsparpotenzial in Abhängigkeit des Prädiktionshorizonts.....	17
Abbildung 3-15 Variscite VAR-SOM-MX6.....	19
Abbildung 3-16 - GPS-Modul GNS 3301 .....	20
Abbildung 3-17 - Car2X-Modul U-Blox THEO P1 mit Transceiver von Cohda Wireless .....	21
Abbildung 3-18 Topologie der Spannungsversorgung des OCT .....	22
Abbildung 3-19 Layout-Entwurf der OCT Platine .....	23
Abbildung 3-20 3D-Modell der Platine .....	23
Abbildung 3-21 Teilbestückter Prototyp .....	24
Abbildung 3-22: Fertiges OCT im Gehäuse.....	24
Abbildung 3-23: Softwarearchitektur zur Anbindung der Hardware an das OCT .....	26
Abbildung 3-24 OCT Software-Architektur.....	27
Abbildung 3-25 Schritte der Codegenerierung (Quelle: MATLAB Dokumentation)...	28
Abbildung 3-26 Links: S-Function-Entwicklungsprozess, Rechts: S-Function“- Anwendungsprozess (Quelle: MATLAB Dokumentation) .....	29
Abbildung 3-27 Anwendung der OCT Simulink Schnittstelle .....	30
Abbildung 3-28: Regelungsmodell blockiert den Überblick.....	32
Abbildung 3-29: Ausgewählte Geschwindigkeitsverläufe für die Überfahrt über eine Bremschwelle .....	33
Abbildung 3-30: Darstellung der mittleren Beschleunigung in Abhängigkeit der Differenzgeschwindigkeit.....	34
Abbildung 3-31: Regelbasierter Algorithmus für den Luftpfad mittels Prädiktionsinformationen .....	34
Abbildung 3-32: Vergleich verschiedener Prädiktions- und konventioneller Strategien in einem WLTC Ladeschritt .....	38
Abbildung 3-33: Kompromiss im WLTC für verschiedene Werte von $k_{NO_x, fac}$ und $k_{boost, fac} = 1$ . Ergebnisse sind in relativen Begriffen in Bezug auf den konventionellen Fall ausgedrückt. ....	39
Abbildung 3-34: Versuchsfahrzeug – Jaguar XE 2,0 I Diesel 132 kW .....	40
Abbildung 3-35: Teststrecke des 26. Aachener Kolloquiums.....	40
Abbildung 3-36: Fahrzeuggeschwindigkeitsvorhersage und gewünschter Ladedruck auf der Teststrecke des 26. Aachener Kolloquiums .....	41

## Abkürzungs- und Formelverzeichnis

### Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
BPS	Boost Pressure Set-Point
C2C	Car to Car
CAM	Cooperate Awareness Messages
CAN	Controller Area Network
Car2X	Car to X
CCP	CAN Calibration Protocol
CPU	Central Processing Unit
CRT	Continuous Regeneration Trap
DENM	Decentralized Environmental Notification Messages
DeNO <sub>x</sub>	Rauchgasentstickung
DeSO <sub>x</sub>	Rauchgasentschwefelung
DPF	Dieselpartikelfilter \ Diesel Particulate Filter
ECU	Engine Control Unit
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FP	Fuel Penalty
GPS	Global Positioning System
GPSd	Global Positioning System DAEMON
IMU	Inertial Measurement Unit
ITS	Intelligent Transport Systems
ITS-G5	Access technology to be used in frequency bands dedicated for European intelligent transport system (ITS)
KFZ	Kraftfahrzeug
LNT	Lean NO <sub>x</sub> Trap
NEFZ	Neue Europäische Fahrzyklus
NMAE	Normalized Mean Absolut Error
NSK	NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysatoren
OCT	Online Calibration Tool
PEMS-System	Portable Emission Measurement System
RAM	Random-Access Memory
RDE	Real Driving Emissions
SCR	Selective Catalytic Reduction
SPaT	Signal Phase and Time
SPI	Serial Peripheral Interface
TCP	Transmission Control Protocol
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VeRa	Steuergeräteplattform der VEMAC
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle
XCP	Universal Calibration Protocol

## Formelzeichen

$i_{\text{GearPred}}$	Prädizierter Gang
$\Delta p_{\text{boost,des}}$	Differenz zwischen prädiziertem und aktuellem Ladedruck
$a_0$	Proportionalitätskonstante für Beschleunigung
$a_{k,\text{max}}$	Maximale Beschleunigung
$b_0$	Proportionalitätskonstante für Verzögerung
$b_{\text{comf}}$	Grenzverzögerung aus Komfortgründen
$b_{k,\text{max}}$	Maximale Verzögerung
$k_{\text{NO}_x,\text{fac}}$	Gradient des Faktors für NO <sub>x</sub> Sollwert
$\text{NO}_{x,\text{fac}}$	Faktor für NO <sub>x</sub> Sollwert
$v_{k,\text{max}}$	Maximale Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{k,\text{safe}}$	Sichere Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{\text{krit}}$	Kritische Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{\text{max,Bs}}$	Maximale Überfahrtgeschwindigkeit für Bremsschwellen
$v_{\text{max,K}}$	Maximale Kurvengeschwindigkeit
$v_{\text{max,TL}}$	Gesetzliches Tempolimit
$v_{\text{veh,Act}}$	Aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{\text{VehPred}}$	Prädizierte Fahrzeuggeschwindigkeit
$\Delta p_{\text{boost,des,corr}}(t)$	Korrigierte gewichtete Differenz zwischen prädiziertem und aktuellem Ladedruck
$\Delta p_{\text{boost,des,wght}}(t)$	Gewichtete Differenz zwischen prädiziertem und aktuellem Ladedruck
$\Delta v$	Differenzgeschwindigkeit
CO	Kohlenmonoxid
$\text{FP}_{\text{avg}}$	Mittlere DeNO <sub>x</sub> Mehrkraftstoffverbrauch
G	Günstigkeitswert für DPF Regeneration
HC	Kohlenwasserstoff
$i_i$	Diskreter Zeitindex
k	Diskreter Zeitindex
$k_{\text{boost,fac}}$	Gradient des korrigierten Soll-Ladedrucks
LiFePO <sub>4</sub>	Lithium-Eisenphosphat
N <sub>2</sub>	Stickstoff
$n_{\text{eng}}$	Drehzahl
NO <sub>x</sub>	Stickoxid
p	Wahrscheinlichkeit
$p_{\text{boost,des}}$	Soll-Ladedruck
$p_{\text{boost,des,corr}}(t)$	Korrigierter Soll-Ladedruck
$p_{\text{final}}$	Ist-Ladedruck
$p_{\text{setpoint}}$	Soll-Ladedruck
t	Zeit
$T_{\text{downstream}}$	Temperatur nach Katalysator
$t_{\text{release}}$	Freigabezeit für DeNO <sub>x</sub>
$t_{\text{wait}}$	Wartezeit zwischen zwei DeNO <sub>x</sub>
$T_{\text{max}}$	Maximale Katalysator Temperatur für DeNO <sub>x</sub>
$T_{\text{min}}$	Minimale Katalysator Temperatur für DeNO <sub>x</sub>
$T_q$ Steigung	Drehmomentgradient
$T_{q,\text{max}}$	Maximale Drehmoment für DeNO <sub>x</sub>
$T_{q,\text{min}}$	Minimale Drehmoment für DeNO <sub>x</sub>
$T_{\text{upstream}}$	Temperatur vor Katalysator



v	Fahrzeuggeschwindigkeit
$\eta_{\text{avg}}$	Mittlere DeNO <sub>x</sub> Effizienz
$\lambda$	Luft-/Kraftstoffverhältnis

# 1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde die Nutzung von Informationen aus der Fahrzeugkommunikation zur Reduktion der Schadstoffemissionen von Dieselmotoren durch prädiktive Motoregelalgorithmen untersucht. Dazu wurde zunächst eine Konzept- und Spezifikationsphase durchgeführt. Hier wurde zu bereits bestehenden Konzepten recherchiert um diese bei der Entwicklung des in diesem Projekt verfolgten Ansatzes zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 3.1). In einem nächsten Schritt wurde ein Simulationsmodell für ein Dieselfahrzeug aufgebaut und dort das Potenzial zur Emissionsreduktion durch eine prädiktive Motorregelung bestimmt. (vgl. Kapitel 3.2). Damit dieses Potenzial in realen Anwendungen abgerufen werden kann, wurde anschließend von der VEMAC GmbH & Co. KG eine Hardware, bezeichnet als OCT (Online Calibration Tool), entwickelt, die verschiedenste Sensoren auf einer Plattform integriert, welche sowohl Rechenkapazität für prädiktive Motorregelalgorithmen als auch eine Schnittstelle zum Motorsteuergerät bietet (vgl. Kapitel 3.3). Parallel dazu wurde an der RWTH Aachen University durch die Juniorprofessur für Mechatronische Systeme am Verbrennungsmotor an den prädiktiven Motorregelalgorithmen geforscht (vgl. Kapitel 3.4). Schlussendlich wurden die Hardware und die Softwarealgorithmen in einem von der FEV Europe GmbH (assoziiertes Partner) zur Verfügung gestellten Versuchsfahrzeug zusammengeführt und in einer Fahrdemonstration auf dem 25. Aachener Kolloquium einem breiten Fachpublikum vorgestellt (vgl. Kapitel 3.4).

Die Potenzialanalyse hat gezeigt, dass es von Vorteil ist, für verschiedene Motorstellgrößen unterschiedliche Vorausschauhorizonte der zukünftigen Lastprofile zu betrachten. So ergeben sich für einen kurzen Vorausschauhorizont ( $t_{\text{Pred}} < 10\text{s}$ ) die größten Einsparpotenziale, wenn korrigierend in die Regelung des Luftpfads eingegriffen wird. Hierbei können die Rußemissionen bis zu 7% und die  $\text{NO}_x$ -Emissionen bis zu 1% reduziert werden. Für mittlere Vorausschauhorizonte ( $10\text{s} < t_{\text{Pred}} < 10\text{min}$ ) kann durch eine vorausschauende Regenerierung des  $\text{NO}_x$ -Speicherkatalysators bei gleichbleibender  $\text{DeNO}_x$ -Effizienz der Kraftstoffverbrauch und somit gleichzeitig die  $\text{CO}_2$ -Emissionen um 1,1% reduziert werden. Wenn noch für deutlich größere Zeithorizonte Informationen zur Verfügung stehen ( $t_{\text{Pred}} > 10\text{min}$ ), kann durch eine prädiktive Regeneration des Dieselpartikelfilters der Gesamtkraftstoffverbrauch im realen Fahrbetrieb um bis zu 5,5 % reduziert werden.

Um die in diesem Projekt aufgezeigten Potenziale, nur durch zusätzliche Informationen deutliche Schadstoffreduktionen zu erreichen, vollständig nutzen zu können, sollten sowohl die Hard- als auch die Software erweitert werden. So könnte die zuvor entwickelte Hardware um zusätzliche Schnittstellen für weitere Sensorik erweitert werden, sodass mittels Radar bzw. Lidar und Kamera auch Fahrzeuge detektiert werden können, die nicht mit Fahrzeugkommunikation ausgestattet sind. Darüber hinaus sollte die Software dahingehend erweitert werden, dass auch zusätzliche Verkehrsinformationsquellen genutzt werden können. Die bisher verwendeten prädiktiven Motorregelalgorithmen sind regelbasiert. Zukünftig ist es erstrebenswert, diese mit echtzeitfähigen mathematischen Optimierungsverfahren zu erweitern. Die für die prädiktiven Motorregelalgorithmen erforderliche Prädiktion des zukünftigen Lastprofils sollte für verschiedenste Situationen und Prädiktionshorizonten validiert werden.

Dieses Projekt wurde gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Az: 33322/01)

## 2 Einleitung

Der Dieselmotor ist dem Ottomotor aufgrund seiner thermodynamischen Prozessführung hinsichtlich seines Wirkungsgrades überlegen und stößt somit bei gleicher abgegebener Leistung weniger klimawirksames CO<sub>2</sub> aus. Dafür hat der Dieselmotor mit erhöhten Schadstoffemissionen wie z.B. NO<sub>x</sub> und Ruß zu kämpfen, die in konzentrierter Form gesundheitsschädlich sind. Um das Gesundheitsrisiko für den Menschen zu minimieren, wurden in den letzten Jahren die gesetzlichen Grenzwerte deutlich verschärft. Jedoch weichen die realen Emissionswerte von Kraftfahrzeugen oft sehr stark von denen ab, die während der Homologation gemessen werden. Ein Hauptgrund dafür sind die deutlich höheren Dynamikanteile im realen Straßenverkehr im Vergleich zu denen der derzeit verbindlichen Fahrzyklen zur Homologation. Eine a-priori Kenntnis der anstehenden Dynamik würde eine optimale Regelung des Motors und seiner Abgasnachbehandlungssysteme ermöglichen.

Neue Informations- und Kommunikationstechnologien ermöglichen es, sowohl die Fahrzeuge untereinander (engl. Car to Car, Car2C) als auch mit der Infrastruktur und ihrer Umgebung (Car to Infrastructure, Car2I) zu vernetzen. Diese Technologien, zusammengefasst als Car2X, erlauben die Entwicklung neuer prädiktiver Algorithmen für eine effiziente und nachhaltige Mobilität im realen Betrieb. Die zurzeit wichtigsten Kommunikationstechnologien sind zum einen Ad-hoc-Netze basierend auf dem IEEE 802.11p Standard und zum anderen Mobilfunknetze der 4. und 5. Generation. Während die aktuellen Ad-hoc-Netze eine begrenzte Reichweite je nach Umgebung von bis zu 500m besitzen, sind Mobilfunknetze räumlich uneingeschränkt nutzbar, solange eine ausreichende Netzabdeckung garantiert ist. Der Mobilfunk kämpft derzeit jedoch noch mit größeren Latenzen, die aber mit der 5. Generation auf unter 1 ms reduziert werden sollen [DMR14].

Im Moment ist die Marktdurchdringung von Fahrzeugen mit entsprechender Kommunikationstechnologie noch recht gering. Alternativ sind digitale Karten mit stetig steigendem Detaillierungsgrad als zusätzliche Quelle für Informationen bezüglich Straßentopologien, Geschwindigkeitsbegrenzungen und dynamischen Verkehrsinformationen verfügbar [MFF10]. Daher verwenden die meisten der aktuell auf dem Markt verfügbaren Systeme allein digitale Karten, wie zum Beispiel für prädiktive Betriebsstrategien von Hybridfahrzeugen [GDB15]; [KPK16]; [JM15]; [SLM17]. Dahingegen stehen Komfort- [NA17] und Sicherheitsanwendungen [BTDO6]; [IWM15], die Informationen aus der Fahrzeugkommunikation berücksichtigen, schon länger im Fokus der Forschung. Heutzutage werden ebenfalls Funktionen untersucht, die auf eine Reduktion des Energiebedarfs abzielen. Für ein konventionell betriebenes Fahrzeug kann so der Kraftstoffverbrauch reduziert werden, indem Informationen über die Ampelsteuerung, bereitgestellt über Car2I-Kommunikation, in einer Optimierung berücksichtigt werden [The15]; [Ter10]; [AV11]. Analog dazu kann ebenfalls der Energiebedarf für ein Elektrofahrzeug reduziert werden [KJP14]. In Abgrenzung zu den zuvor genannten Arbeiten, soll in diesem Projekt die Möglichkeit geschaffen werden, Informationen sowohl aus digitalen Karten als auch aus der Fahrzeugkommunikation für die prädiktive Motoregelung zur Verfügung zu stellen.

Die Projektpartner haben sich in diesem Projekt das Ziel gesetzt, einen Beitrag zur Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte im realen Fahrbetrieb zu leisten und somit Mensch und Natur zu schützen. Ein Großteil der Schadstoffe entsteht im transienten

---

Motorbetrieb. Diese Schadstoffe sollen durch eine vorausschauende Motorregelung reduziert werden, indem zukünftige Lastprofile basierend auf Informationen aus der Fahrzeugkommunikation prädiziert und dem Motorsteuergerät zur Verfügung gestellt werden. Dazu soll eine vorwettbewerbliche Potenzialermittlung durchgeführt und anschließend ein Werkzeug in Form eines frei programmierbaren Steuergeräts mit zugehöriger Algorithmen-Toolbox geschaffen werden. Die dazu erforderliche Hardware soll mit einem integrierten ITS-G5 Modul zur Car2X-Kommunikation, einem GPS-Modul und einem Beschleunigungssensor ausgestattet werden, um eine Vorhersage der zukünftigen Fahrdynamik zu ermöglichen. Dazu werden die Informationen der Sensoren und der Module ausgelesen, interpretiert und dem Motorsteuergerät für seine Regelungsalgorithmen bereitgestellt. Abschließend sollen die Algorithmen und Hardware zusammengeführt und in einem modernen Dieselfahrzeug getestet werden.

## 3 Hauptteil

### 3.1 Konzept und Spezifikation

Da momentan auf dem Markt befindliche Steuergeräte bisher nicht über die für die Car2X-Kommunikation erforderlichen Funkübertragungsmodule und die benötigte Sensorik verfügen, soll im Rahmen des Projektes ein Entwicklungswerkzeug geschaffen werden, welches die Car2X Kommunikation herstellt und die so empfangenen Informationen durch gezielte Einflussnahme auf die Steuergerätedaten nutzenbringend einsetzen kann.

Das Online Calibration Tool (OCT) der Firma VEMAC bietet als Kalibriersystem die Möglichkeit, Laufzeitdaten von Steuergeräten zu lesen und zu beeinflussen. Moderne Steuergeräte verwenden hierfür in der Regel verschiedene genormte Schnittstellen (XCP, CCP, usw.). Das OCT unterstützt die gängigsten Schnittstellen, um auf die Daten zuzugreifen und diese dem Anwender unter anderem per Web-Schnittstelle zur Verfügung zu stellen. Darüber hinaus ist ein Zugriff auf den Datenpool des OCTs für die Implementierung eigener Oberflächen oder Applikationen über eine offene Anwendungsschnittstelle vorhanden.

Im Rahmen des Projektes soll die Hardware und Software des OCT so erweitert werden, dass Car2X Daten anderer Verkehrsteilnehmer empfangen, ausgewertet und dem Datenpool hinzugefügt werden können. Zusätzlich zum Datenempfang soll das OCT selbst als aktiver standardkonformer Netzwerkknoten fungieren und seine Positionsdaten versenden. Zum Ermitteln und Versenden der eigenen Positionsdaten werden der Hardware unter anderem ein GPS-Empfangsmodul, ein Beschleunigungssensor und ein Car2X Modul hinzugefügt.

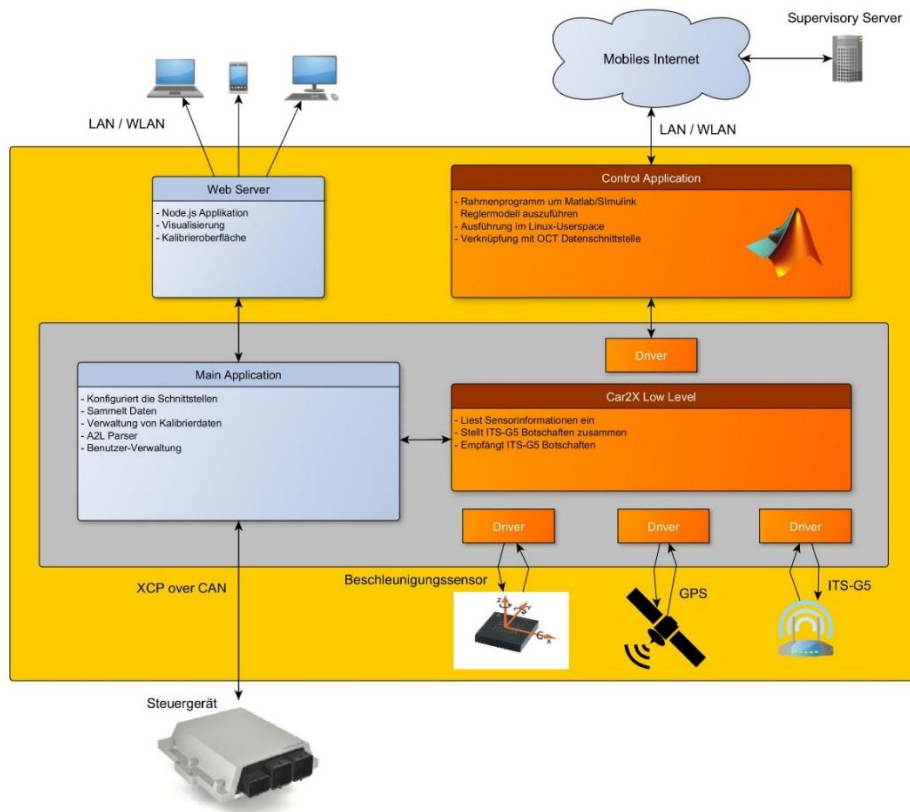


Abbildung 3-1: Aufbau und Schnittstellen des OCT Systems

Der Zugriff auf Steuergeräte ist im Allgemeinen auf die Prozessdaten beschränkt, eine Beeinflussung des Programmablaufs ist in der Regel nicht ohne weiteres möglich. Durch die kontinuierliche Anpassung von Steuergerätesollgrößen können jedoch neue Funktionen implementiert werden, ohne Änderungen an der Steuergerätesoftware vornehmen zu müssen. Diese Änderungen können mit Hilfe von externen Regelanwendungen modelliert und simuliert werden (Control Application). Als Modellierungstool für die Control Application wird MATLAB/Simulink eingesetzt.

### 3.1.1 Softwareschnittstelle zwischen Applikation und Basissoftware

Für den Zugriff auf den Datenpool des OCTs soll im Projektverlauf eine Simulink-Schnittstelle erstellt werden, welche einerseits dem Modell die Messdaten zur Verfügung stellt und andererseits den Schreibzugriff auf die Sollwerte des Steuergerätes ermöglicht. Die Kommunikation der Simulink Schnittstelle mit der OCT Main Application erfolgt über Standard-Netzwerkprotokolle. Dadurch kann die Control Application wahlweise direkt auf dem Prozessor der OCT Hardware oder auf einem externen System ausgeführt werden.

Die Daten der neu zu integrierenden Sensoren (GPS, IMU, Car2X) sollen ebenfalls in den Datenpool des OCT integriert werden, wodurch alle Daten über eine einheitliche Simulink-Schnittstelle verfügbar gemacht werden.

Die Car2X Kommunikation in Europa ist im Standard ETSI-ITS-G5 definiert. Dieser sieht verschiedene Kommunikationspakete vor, welche entweder zyklisch oder ereignisorientiert versendet werden:

*Cooperate Awareness Messages (CAM)* werden zyklisch von jedem Teilnehmer versendet und enthalten unter anderem Positionsdaten, Geschwindigkeit und Bewegungsvektor.

*Decentralized Environmental Notification Messages (DENM)* werden als Reaktion bei erkannten Ereignissen (z.B. Notbremsung, Pannenfahrzeug, Stauende) versendet.

*Signal Phase and Time (SPaT)* werden *ausschließlich* von Signalanlagen wie Ampeln versendet. Sie geben periodisch aktuelle und zukünftige Signalzustände und Umschaltzeiten.

Tabelle 3.1.1 zeigt eine Übersicht einiger in den CAM und DENM Paketen enthaltenen Informationen. Die Inhalte der empfangenen Nachrichten sollen in den Datenpool des OCT integriert werden, sodass diese der Control Application zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung stehen.

Information	Typ	Sendertyp (Fahrzeug oder Infrastrukturknoten)	Beschreibung
<b>Geo Position</b>	CAM	jeder	Letzte bekannte GPS-Position
<b>Speed</b>	CAM	Fahrzeug	Aktuelle Geschwindigkeit
<b>Heading</b>	CAM	Fahrzeug	Aktuelle Ausrichtung (Abweichung von Norden)
<b>Light</b>	CAM	Fahrzeuge	Beleuchtung von Fahrzeugen
<b>Vehicle Role</b>	CAM	Fahrzeuge	Spezielle Form von Fahrzeugen, wie Rettungswagen, Polizei usw.
<b>Event Type</b>	DENM	Jeder	Typ eines aufgetretenen Ereignisses
<b>Information Quality</b>	DENM	Jeder	Plausibilität des Ereignisses
<b>Location</b>	DENM	Jeder	Position eines Ereignisses
<b>Road Type</b>	DENM	Jeder	Straßentyp auf dem das Ereignis stattgefunden hat (Autobahn, Landstraße, ...)
<b>Traces</b>	DENM	Jeder	Bewegungsvektor des Ereignisses

**Tabelle 3.1.1: Übersicht einiger Daten der Car2X-Nachrichten**

Die Softwareplattform ist darüber hinaus so ausgelegt, dass bei Bedarf zusätzlich zu den Car2X und Positionsdaten weitere Sensordaten oder Informationen über das Internet (Cloud-Daten) integriert und der Control Application zur Verfügung gestellt werden können.

### 3.1.2 Regelstrategien zur Reduzierung der Schadstoffemissionen

Der Dieselmotor kann im Vergleich zum Ottomotor aufgrund seiner thermodynamischen Prozessführung effizienter betrieben werden, hat jedoch ein deutlich höheres

Emissionsniveau. In diesem Projekt werden Strategien untersucht, die insbesondere die Rohemissionen an Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) aber auch Ruß und den Kraftstoffverbrauch ohne zusätzliche kostenintensive Abgasnachbehandlungssysteme, sondern nur durch neuartige Regelalgorithmen basierend auf Informationen der Car2X Kommunikation reduzieren. Um zunächst das Potenzial verschiedener Ansätze abzuschätzen, wird in einem ersten Schritt ein motorspezifisches Simulationsmodell zur Berechnung von  $\text{NO}_x$ -Emissionen und der DPF Beladung aufgebaut. Drei verschiedene prädiktive Strategien (Anhebung des Ladedrucks, Regeneration  $\text{NO}_x$ -Speicher-katalysator, Regeneration Partikelfilter) und ihr Einfluss auf die Reduzierung der Emissionen werden simulativ untersucht. Hierbei wird zunächst die Annahme getroffen, dass eine ideale Prädiktion des Geschwindigkeitsverlaufs vorhanden ist, um den Effekt der jeweiligen Strategie isoliert zu betrachten. Im weiteren Verlauf des Projektes, wird die Strategie mit dem größten Potenzial näher untersucht und ein optimierter Regelalgorithmus für den Einsatz im Realfahrzeug entwickelt. Hierzu werden ebenfalls Prädiktionsmodelle für die Verkehrssituationen und das Fahrverhalten des eigenen Fahrzeugs benötigt, um den eigenen Geschwindigkeitsverlauf für einen Prädiktionshorizont vorherzusagen.



## 3.2 Simulative Potenzialanalyse zur Emissionsreduktion

### 3.2.1 Einführung

Durch Vernetzung von Fahrzeugen ergibt sich auch die Möglichkeit den Antriebsstrang zu verbessern. Für Dieselfahrzeuge ist das Verbesserungspotenzial vor allem in Bezug auf die Schadstoffemissionen wichtig. Insbesondere Einhalten der erlaubten Emissionswerte der Schadstoffe Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) und Ruß im realen Fahrbetrieb sind eine Herausforderung. Die bisherigen Lösungsansätze für eine Reduzierung der Emissionen setzen an zwei grundsätzlich unterschiedlichen Stellen an. Zum Beispiel wurden zur Reduktion der Motorrohmission die Abgasrückführung (AGR) und Ladedruckregelung optimiert oder es wurden SCR-Katalysatoren und/oder  $\text{NO}_x$ -Speicherkatalysatoren (NSK) zur Emissionsreduktion eingesetzt. Durch strenge Partikelgrenzwerte ist zusätzlich zu den innermotorischen Verbesserungen eine Filterung des Abgases durch einen Dieselpartikelfilter (DPF) notwendig.

Ziel der Simulation ist es zu zeigen, dass eine Kenntnis der zukünftigen Fahrzustände die Effizienz dieser Systeme unter realen Fahrbedingungen steigert. Für die Ermittlung haben sich drei Prädiktionshorizonte abgezeichnet, denen verschiedene Teilsysteme zugeordnet werden konnten, siehe Abbildung 3-2.

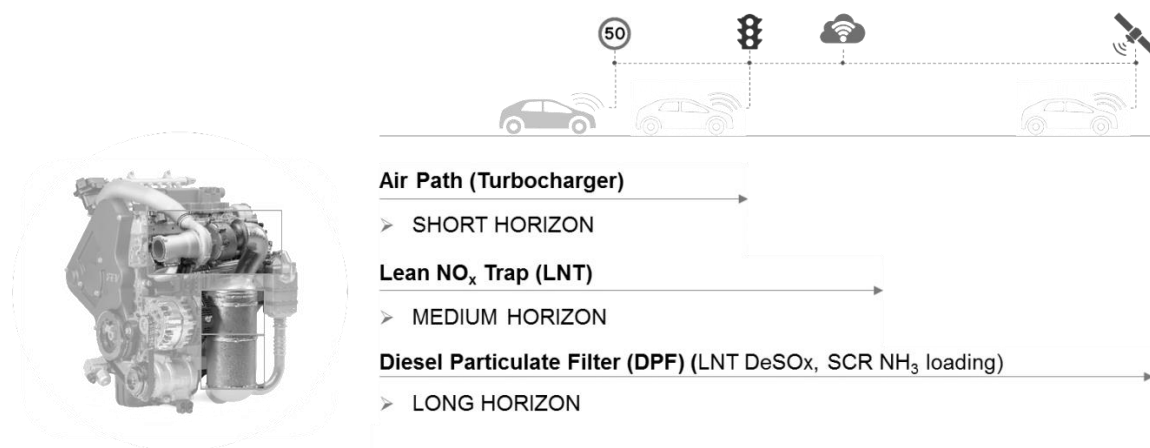


Abbildung 3-2: Untersuchte Prädiktionshorizonte mit Zuweisung der Teilsysteme

Die folgende Untersuchung konzentriert sich auf den kurzen, den mittleren und den langen Prädiktionshorizont. Während der kurze und der mittlere Prädiktionshorizont gut mit den Technologien „Car to Car“ (Car2C) und „Car to Infrastructure“ (Car2I) abgebildet werden kann, sind beim langen Horizont auch Navigationsdaten hinzuzuziehen.

### 3.2.2 Randbedingungen und Simulationsergebnisse

Die Untersuchungen werden an einem C-Segment Fahrzeug mit einem 2,0 L Vierzylinder-Dieselmotor mit einstufigem Turbolader, gekühlter Hochdruck und gekühlter Niederdruck AGR durchgeführt. Das Abgasnachbehandlungssystem besteht aus einem  $\text{NO}_x$ -Speicherkat (NSK) und einem Dieselpartikelfilter (DPF). Fahrten, die in dieser Studie berücksichtigt werden, sind der World Wide harmonized Light Duty

Test Cycle (WLTC) zur Untersuchung des Luftpfads und mehrere Real Driving Emissions (RDE) konforme kundennahe Fahrzyklen, um die Emissionen im praktischen Fahrbetrieb für die NSK und DPF Simulationen zu messen. Modernste Engine Control Unit (ECU) Regelstrategien werden berücksichtigt und in die MATLAB-Simulink Testumgebung eingebettet. Des Weiteren werden für die Teilsysteme Prädiktionsstrategien entwickelt und in Bezug auf Emissionen und Kraftstoffverbrauch analysiert.

### 3.2.3 Kurzer Prädiktionshorizont – Luftpfad

Ein kurzer Prädiktionshorizont erfordert eine geringe Vorlaufzeit von Signalen. Dadurch kann eine Verbesserung der Ladedruckregelung verwirklicht werden. Ziel der Simulation ist es das Reduktionspotenzial zu bewerten.

#### 3.2.3.1 Funktionsbeschreibung (Komponenten und Simulationsmodell)

**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt das in diesem Projekt verwendete Mittelwertmodell zur Simulation von Dieselmotoren. Das Modell wurde von der FEV GmbH für 0D/1D-Simulationen und zur Funktionsentwicklung von Dieselmotoren entwickelt. Es umfasst ein physikalisches Luftpfad- und Verbrennungsmodell sowie eine Reglerarchitektur, die auf einem modellbasierten und skalierbaren Ansatz beruht [SSM15]; [RHP15]; [BVA16]. Dank des physikalischen Aufbaus ist das Modell flexibel hinsichtlich Änderungen des Hardwareaufbaus. Darüber hinaus kann es einfach an andere Konfigurationen angepasst werden, indem nicht benötigte Hardwarekomponenten im Modell ausbedatet werden [LQS17].

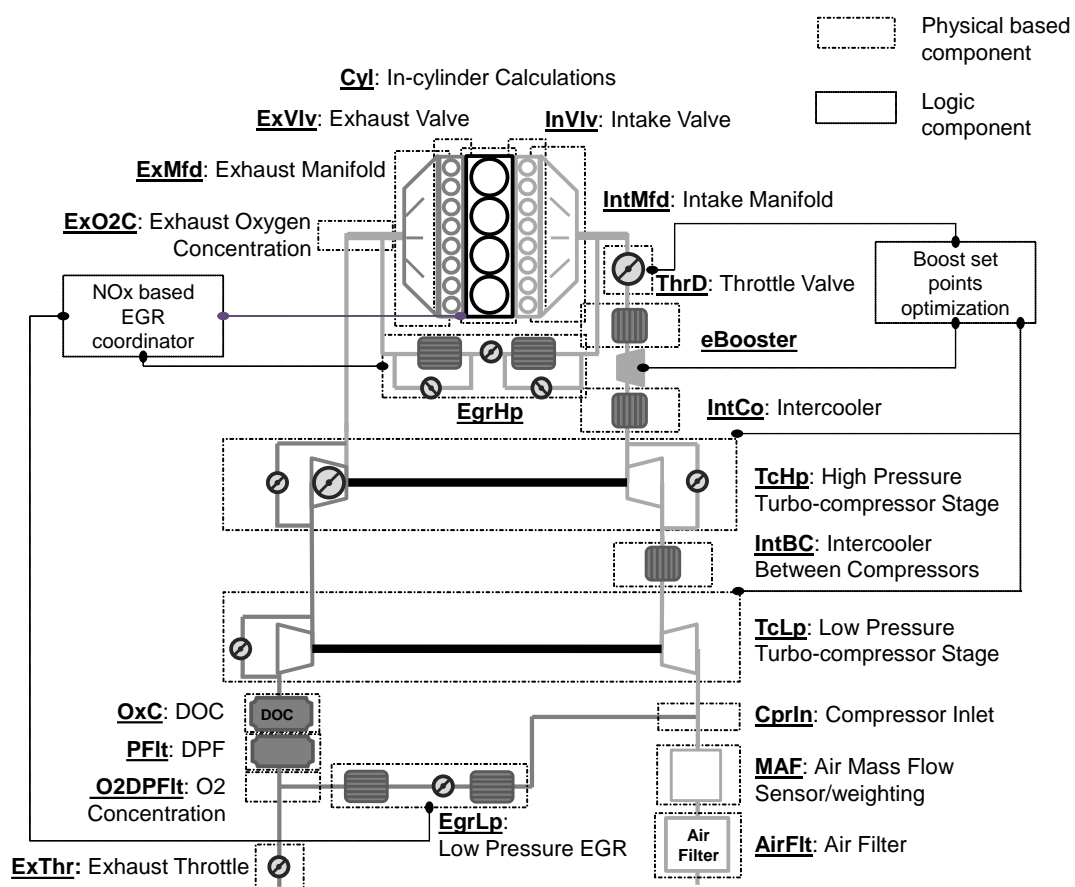


Abbildung 3-3: Aufbau des verwendeten Simulationsmodells für Dieselmotoren

So wurde für die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen die prinzipiell vorhandene Niederdruckstufe des Turboladers ausgeschaltet. Um die Zielwerte der Sauerstoffkonzentrationen im Zylinder, im Einlasskrümmer und an den Mischstellen von AGR und Frischluft zu bestimmen, wird ein NO<sub>x</sub>-Zielkennfeld kalibriert und mithilfe eines invertierten NO<sub>x</sub>-Modells, die zur Erreichung der Zielvorgaben erforderlichen Sauerstoffkonzentrationen berechnet. Basierend auf den Zielvorgaben für die Sauerstoffkonzentrationen wird die benötigte AGR bestimmt [KSM14]. Dieser physikalisch basierten Strategie folgend wird eine Ladedruckregelung aufgebaut, deren Ladedrucksollwert online unter Berücksichtigung von Pumpverlusten und Rußemissionen optimiert wird. Hierauf basierend werden die Stellgrößen des Aufladeaggregats auf ihre Zielwerte eingestellt, um den gewünschten Druck im System zu erreichen [RSB14].

### 3.2.3.2 Ergebnisse

Die Ansprechverzögerung des Turboladers beeinflusst die Emissionen erheblich. Kritische Betriebsbedingungen bestehen meist aus starken Beschleunigungen und Situationen in denen hochgeschaltet wird, wobei eine die Turboladerdynamik übertreffende positive Drehmomentsteigerung nötig ist. Die grauen Kurven in Abbildung 3-4 zeigen dies anhand eines beispielhaften WLTC Ausschnitts bei 1512-1516 Sek.. Im unteren Teil der Abbildung werden das gewünschte Drehmoment und die Motordrehzahl dargestellt; im mittleren Graphen sind der gewünschte AGR-Massenstrom und der Einlassladedruck abgebildet; im obersten Diagramm sind die aktuellen Ruß- und NO<sub>x</sub>-Emissionen dargestellt. Das Turboloch verursacht eine Abweichung des Ladedrucks ( $p_{\text{rinal}}$ ), welches sich negativ auf die Rußemissionen auswirkt. Gleichzeitig verhindert der geringe Ladedruck einen erhöhten Niederdruck-AGR Massenstrom und bewirkt somit einen Spitzenwert der NO<sub>x</sub>-Emissionen.

Um dieses Problem anzugehen, erfolgt die Vorhersage des gewünschten Ladedrucks gemäß Prädiktionshorizont. Dieser Ansatz zur Beschränkung der Ruß- und NO<sub>x</sub>-Emissionen bewirkt vor der Drehmomentanforderung einen Überschuss an Ladedruck, wodurch der Kraftstoffverbrauch negativ beeinflusst werden kann. Beide Auswirkungen, positiv sowie negativ, müssen vorsichtig ausbalanciert werden. Die schwarzen Striche in Abbildung 3-4 stellen ein Beispiel für einen solchen Ausgleich dar. Die Voraussagestrategie zieht die Erhöhung des gewünschten Ladedrucks um den Prädiktionshorizont (im Beispiel 1,3 s) vor, sodass der Einlasskrümmerdruck ( $p_{\text{rinal}}$ ) mit dem gewünschten Druck ( $p_{\text{setpoint}}$ ) der üblichen Vorgehensweise übereinstimmt. Ein offensichtlicher Vorteil des erhöhten Ladedrucks ist eine Verringerung des Rußspitzenwerts von  $t=1513,5$  s. Aufgrund dieses erhöhten Ladedrucks ist eine Steigerung des Niederdruck-AGR Massenstroms mit gleichzeitiger Reduktion des Spitzenwerts der NO<sub>x</sub>-Motorrohmission möglich. Nachteile hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs werden nicht angezeigt, da diese für das analysierte Beispiel zu vernachlässigen sind.

Die Simulationen werden für verschiedene Prädiktionshorizonte durchgeführt. Hierzu ist in Abbildung 3-5 das Gesamtemissionspotenzial des WLTC abgebildet. Ruß- und NO<sub>x</sub> Emissionen zeigen einen bemerkenswerten Vorteil von 5,2 % bzw. 2,2 % bei einem Prädiktionshorizont von 1,3 Sek. Aufgrund des erhöhten Ladungswechselerlustes hervorgerufen durch den höheren Aufladegrad kann es zu einem leichten Anstieg des Kraftstoffverbrauchs kommen.

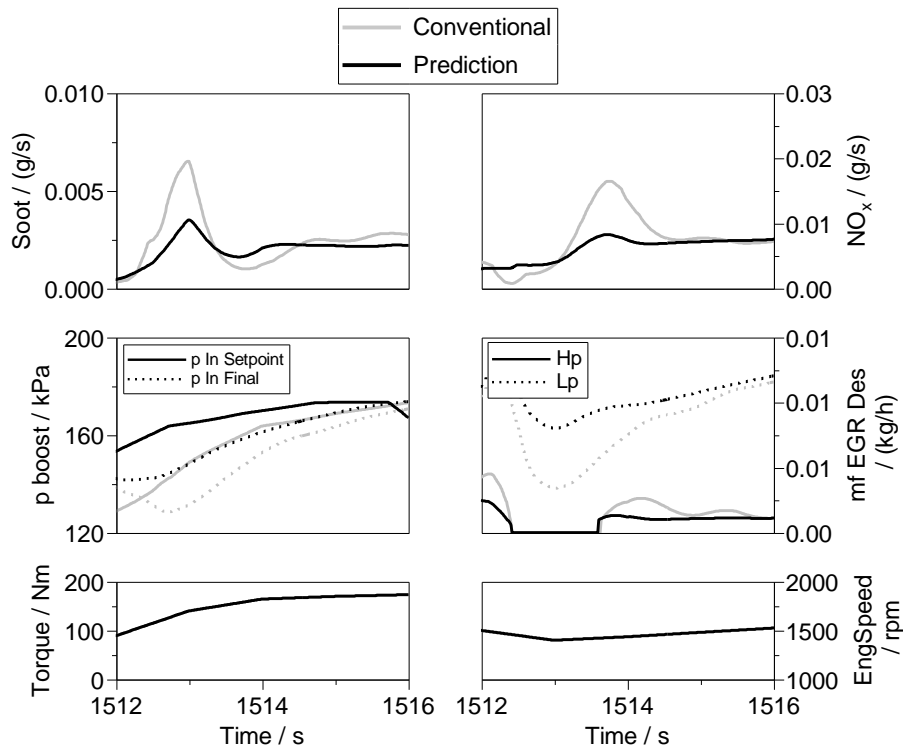


Abbildung 3-4: Vergleich zwischen konventioneller und prädiktiver Regelung

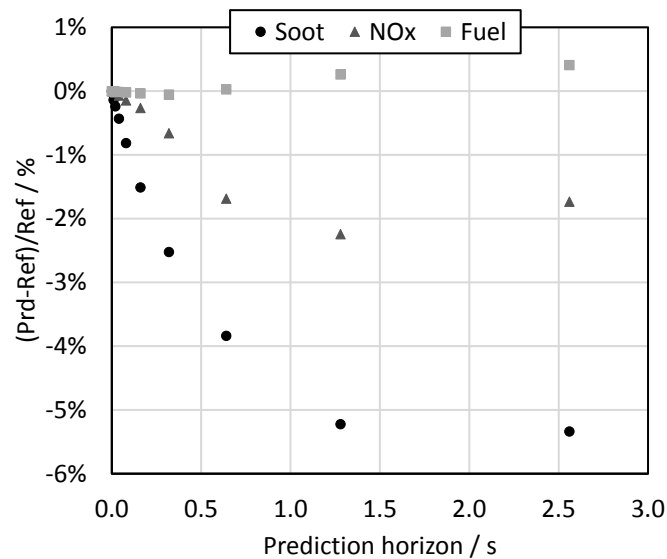


Abbildung 3-5: WLTC Ergebnisse für verschiedene Prädiktionen

### 3.2.4 Mittlerer Prädiktionshorizont – NO<sub>x</sub> Speicher Katalysator (NSK)

Ein mittlerer Prädiktionshorizont ermöglicht größere Vorlaufzeiten von Signalen welche für eine verbesserte Regelung des NO<sub>x</sub> Speicherkatalysators (NSK) benötigt werden. Beim NSK handelt es sich um ein diskontinuierlich betriebenes System, das die NO<sub>x</sub>-Emissionen mindert, in dem es NO<sub>x</sub> in einer Beladungsphase speichert und in einem Regenerationsevent, das eingespeicherte NO<sub>x</sub>- zu Stickstoff (N<sub>2</sub>) umwandelt.

Hierbei werden unter überstöchiometrischen Verbrennungsbedingungen im Motor ( $\lambda > 1$ ) NO<sub>x</sub> aus dem Abgas in eine Speicherstruktur adsorbiert. Unter unterstöchio-

metrischen Verbrennungsbedingungen des Motors ( $\lambda < 1$ ) enthält das entstehende Abgas Kohlenwasserstoff- (HC-) und Kohlenmonoxid- (CO) Anteile, welche dazu führen das NO<sub>x</sub> aus der Speicherstruktur desorbiert und weiter zu N<sub>2</sub> reagiert. Dadurch wird der Speicher entleert weshalb diese Phase als Regenerationsevent (DeNO<sub>x</sub>) bezeichnet wird. Zusätzlich muss in regelmäßigen Abständen der Katalysator von Schwefel befreit werden (DeSO<sub>x</sub>), hierfür werden besonders hohe Temperaturen und ebenfalls ein Motorbetrieb mit  $\lambda < 1$  benötigt. Der Motorbetrieb mit  $\lambda < 1$  ist nur in einem gewissen Betriebsfenster des Motors möglich. Im Fahrzeugbetrieb muss die Beladungsphase und das Regenerationsevent des NSK geregelt werden, um Emissionsdurchbruch zu vermeiden. Um geeignete Zeitintervalle für die jeweiligen Betriebsphasen des NSK zu planen werden die größeren Vorlaufzeiten benötigt. Eine Abgasanlage mit einem NSK hat aufgrund der benötigten Regenerationsevents mit  $\lambda < 1$  einen höheren Kraftstoffverbrauch. Ziel war es, den Kraftstoffmehrerverbrauch bei gleichbleibenden Emissionswerten zu vermindern.

### 3.2.4.1 Funktionsbeschreibung (Komponenten und Simulationsmodell)

Das LNT-Modell, welches für die Simulationsarbeit in Betracht gezogen wird, ist ein kartenbasiertes Modell der FEV GmbH für Konzeptsimulationen und Diesel-Funktionsentwicklung. Das Modell berücksichtigt eine große Anzahl an individuellen Subprozessen des Katalysators. Besonders interessant für die vorliegende Studie ist der DeNO<sub>x</sub> Koordinator, welcher eine moderne ECU Kontrollstrategie mit drei Hauptblöcken repräsentiert:

1. DeNO<sub>x</sub> Anfrage – Start, welche die Grundanfrage unter Berücksichtigung eines NO<sub>x</sub> Ladeschwellenwerts und mehreren Berichtigungsfunktionen abhängig von der Fahrsituation (z.B. Betriebspunkt, Fahrzeuggeschwindigkeit und Gang), Katalysatortemperatur und Umgebungsbedingungen evaluiert.
2. DeNO<sub>x</sub> Anfrage – Stop, welche die Stoppanfrage unter Berücksichtigung eines NO<sub>x</sub> Ladeschwellenwerts,  $\lambda$  Durchbruch und Zeitüberschreitungsereignisses evaluiert.
3. DeNO<sub>x</sub> Freigabe, welche verschiedene Freigabefunktionen in Betracht zieht, zum Beispiel Katalysatorbedingungen ( $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$ ,  $T_{\text{upstream}}$ ,  $T_{\text{downstream}}$ ), Motorbedingungen ( $T_{q\min}$ ,  $T_{q\max}$ ,  $T_{q \text{ Steigung}}$ ,  $n_{\text{eng}}$ , Kühltemperatur, Batteriespannung, Gang), Sensorbedingungen ( $\lambda$  Sensorbereitschaft), Umgebungsbedingungen, Mindestzeit zwischen zwei DeNO<sub>x</sub> Ereignissen, etc.

### 3.2.4.2 Ergebnisse

Wie zuvor beschrieben löst die konventionelle Strategie ein NO<sub>x</sub> Ereignis aus, sobald der NO<sub>x</sub>-Schwellenwert für DeNO<sub>x</sub> Start erreicht wird (vgl. Abbildung 3-6). Falls während des DeNO<sub>x</sub>-Ereignisses das erlaubte Betriebsfenster verlassen wird, wird das Regenerationseignis vor Erreichen des NO<sub>x</sub>-Schwellenwerts für DeNO<sub>x</sub> Stop abgebrochen. Kritische Randbedingungen im praktischen Fahrbetrieb (engl.: Real Driving Emissions –RDE) sind hauptsächlich Motordrehzahl und -drehmoment, welche sich während der Dauer eines DeNO<sub>x</sub>-Ereignisses schnell verändern können (typisch von 3 s bis 10 s).

Die Kontrolllogik, dargestellt in Abbildung 3-6, wird umgesetzt und mit Fokus auf Geschwindigkeits- und Ladebeschränkungen simuliert. Das Grundkonzept ist eine Verlagerung eines DeNO<sub>x</sub>-Ereignisses, falls die Bedingungen für die Fertigstellung nicht erfüllt werden. Die Untersuchung nutzt eine vereinfachte Strategie mit dem Ziel einen Abbruch von Regenerationen zu umgehen, jedoch noch ohne eine gleichzeitige Op-

timierung der DeNO<sub>x</sub>- Effizienz und des Kraftstoffverbrauchs. Um der Prädiktionsstrategie mehr Freiheitsgrade bezüglich der Verlagerung von DeNO<sub>x</sub>-Ereignissen zu gewähren, wird ein Kontrollfenster für eine maximale NO<sub>x</sub>-Ladung vorgestellt. Der niedrige NO<sub>x</sub>-Schwellenwert legt fest, wann die Regeneration frühestens starten darf. Der hohe NO<sub>x</sub>-Schwellenwert definiert die Höchstmenge an gespeichertem NO<sub>x</sub>, die im Katalysator erlaubt ist. Ein DeNO<sub>x</sub>-Ereignis wird gestartet, wenn vorhergesagt wird, dass die Freigabebedingungen länger erfüllt sind als für die Katalysatorleerung benötigt wird.

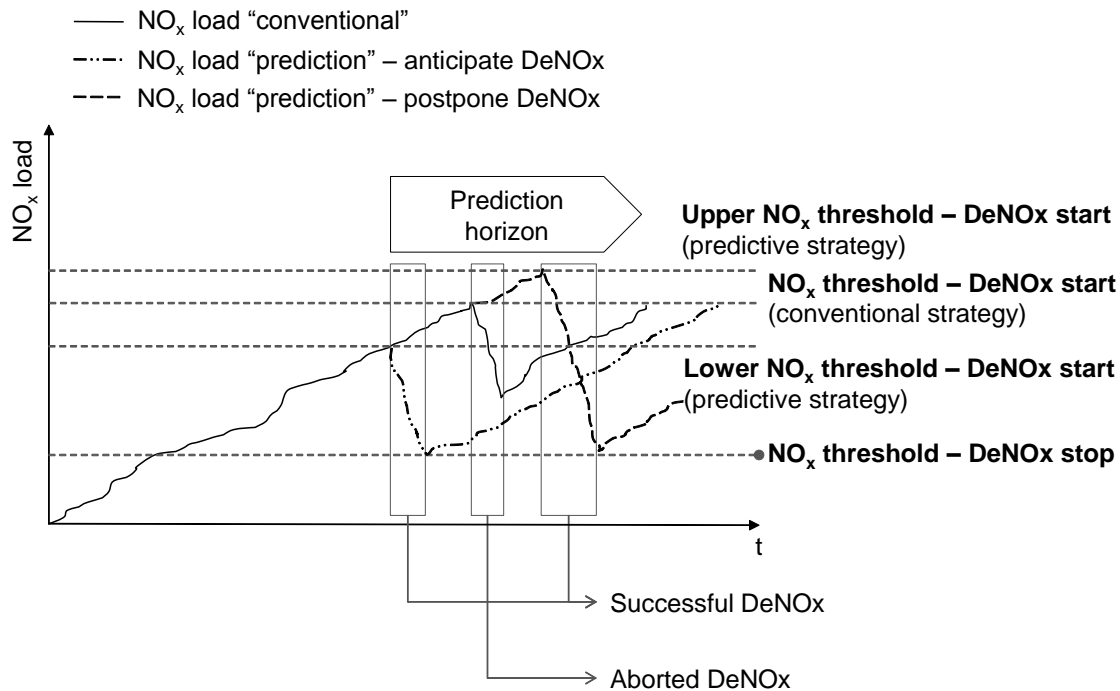


Abbildung 3-6: Darstellung Zeitfenster für mögliche DeNO<sub>x</sub> Events

Die konventionellen und die prädiktiven Strategien werden über mehrere RDE Zyklen in einem simulierten Umfeld getestet.

Abbildung 3-7 präsentiert die Simulationsergebnisse eines repräsentativen RDE Zyklus. Der unterste Teil der Abbildung stellt die Freigabezeit ( $t_{\text{release}}$ ) sowie die Wartezeit zwischen zwei DeNO<sub>x</sub>-Ereignissen ( $t_{\text{wait}}$ ) dar. Ein Zusammenhang zwischen den langen Regenerationsintervallen und den urbanen Streckenabschnitten (definiert durch eine Fahrzeuggeschwindigkeit von weniger als 60 km/h) kann dank der niedrigen Teillast-Betriebspunkte und einem dementsprechend niedrigen Niveau der NO<sub>x</sub>-Motorrohmissionen festgestellt werden.

Des Weiteren wird im Vergleich zu außerstädtischen oder Autobahnfahrten ein längerer Prädiktionshorizont bei urbanem Betrieb benötigt. Abbildung 3-7 zeigt darüber hinaus, dass die prädiktive Strategie insbesondere im urbanen Betrieb erheblich Kraftstoff einspart in welchem bei konventioneller Strategie mehrere DeNO<sub>x</sub>-Ereignisse scheitern. Dennoch kann ein Umgehen der DeNO<sub>x</sub>-Ereignisabbrüche zu einer erhöhten gemittelten NO<sub>x</sub>-Ladung führen, was wiederum einen leicht negativen Einfluss auf den DeNO<sub>x</sub>-Wirkungsgrad ausübt. Um diesen Kompromiss zu quantifizieren, wird eine Serie von RDE-Zyklen analysiert (vgl. Abbildung 3-8). Das Streuband zeigt einen gemittelten DeNO<sub>x</sub>-Wirkungsgrad ( $\eta_{\text{avg}}$ ) von 65 % in Kombina-

tion mit einem verringerten zusätzlichen Kraftstoffverbrauch ( $FP_{avg}$ ) von ca. 1 % im Fall der Prädiktionsstrategie.

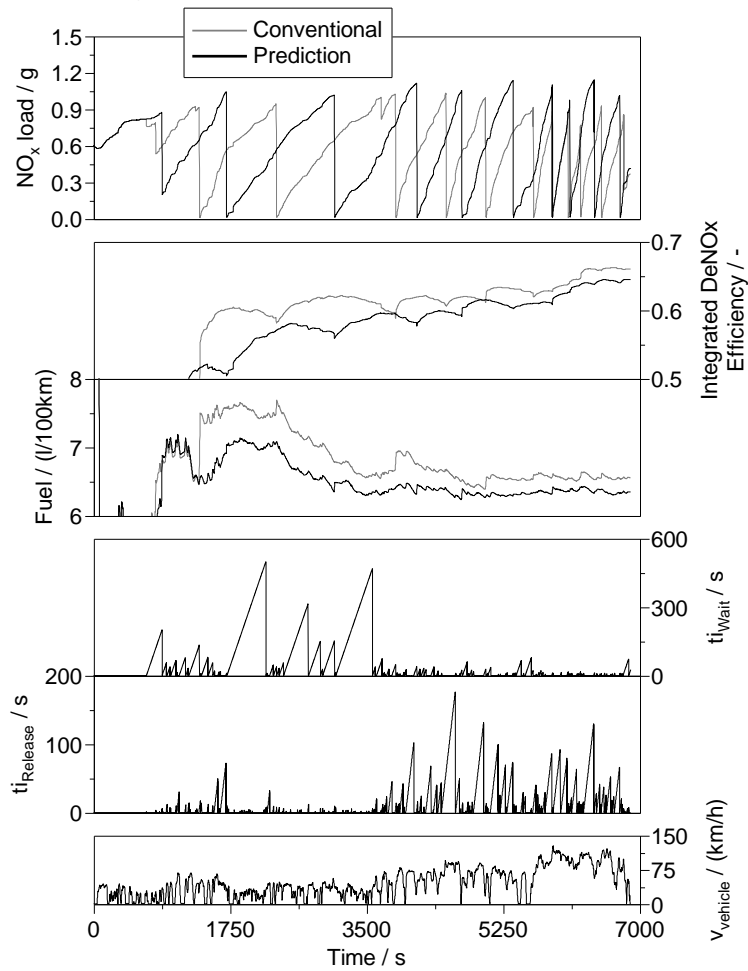


Abbildung 3-7: Beispielresultat eines repräsentativen RDE-Zyklus

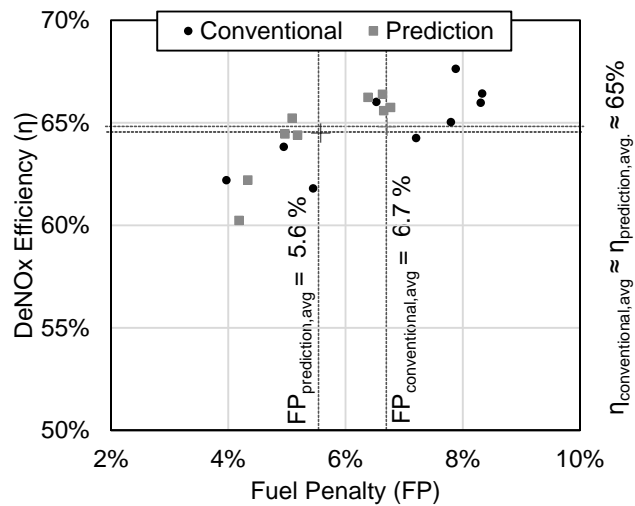


Abbildung 3-8: Kraftstoffmehrverbrauch und DeNOx-Effizienz

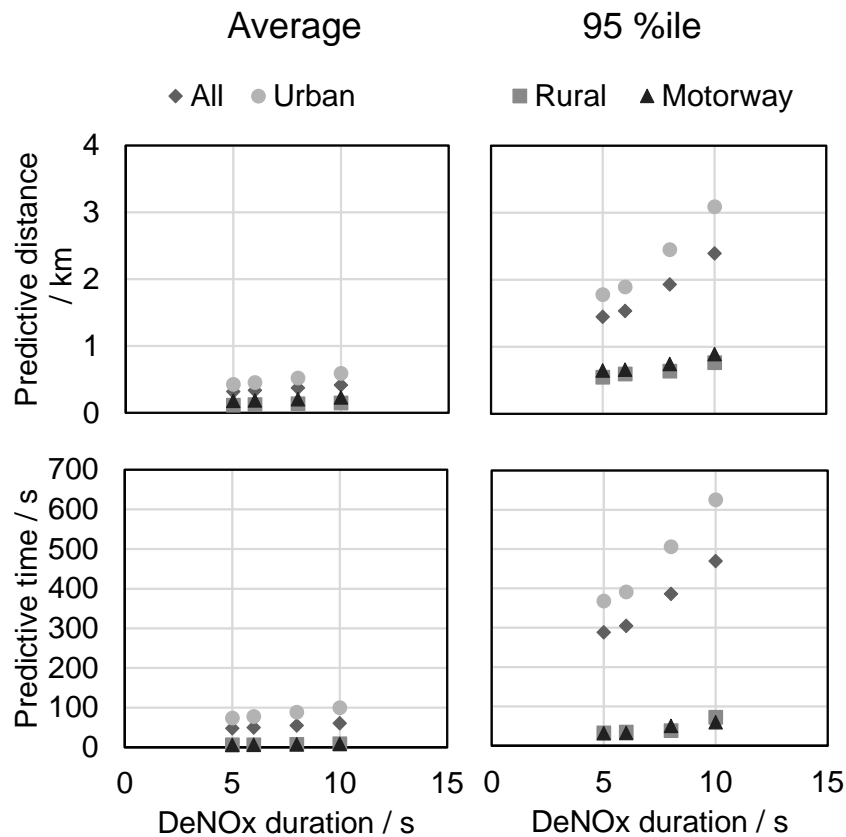


Abbildung 3-9: Vorlaufzeit und Prädiktionshorizont für DeNOx Events

Abbildung 3-9 quantifiziert die Prädiktionszeit und -distanz als Funktionen der DeNO<sub>x</sub>-Ereignisdauer für die urbanen, außerstädtischen und Autobahnabschnitte. Der erste ist immer länger als die nachfolgenden, da unterschiedliche NO<sub>x</sub>-Rohemissionen (niedriger während des urbanen Abschnitts und höher wenn auf der Autobahn beim Autobahnfahren) und der unterschiedlichen Fahrdynamik (urbanes Fahren ist dynamischer als der Autobahnbetrieb). Zusätzlich gibt es einen großen Unterschied im Prädiktionshorizont (Distanz/Zeit) der durchschnittlichen und der 95-prozentigen Wahrscheinlichkeit ein DeNO<sub>x</sub>-Verfahren durchzuführen. Um die 95 % abzudecken, muss der Prädiktionshorizont im Vergleich zur durchschnittlichen Wahrscheinlichkeit um bis ins Sechsfache der ursprünglichen Größe ansteigen.

### 3.2.5 Großer Prädiktionshorizont – Dieselpartikelfilter (DPF)

Eine potentielle Anwendung für weitreichende vorausschauende Streckeninformationen ist die Regenerationsstrategie des Dieselpartikelfilters (DPF). Ziel ist es, mit einer vorausschauenden Strategie einen optimalen Regenerationszeitpunkt für den Dieselpartikelfilter zu finden. Vorteile sind weniger Regenerationsabbrüche, ein vollständiger Rußabbrand und eine geringere thermische Belastung des DPF. Eine Verbesserung der Effizienz der DPF Regeneration leistet hier über die Absenkung des  $K_i$  Faktors einen Beitrag die CO<sub>2</sub> und Schadstoff-Emissionen zu reduzieren.

#### 3.2.5.1 Funktionsbeschreibung (Komponenten und Simulationsmodell)

Konventionelle Regenerationsstrategien arbeiten mit Regenerationskoordinatoren, die auf Basis sämtlicher Kenngrößen eine Regeneration anfragen (Request), auslö-



sen (Release) und beenden (Stop) können. Wird eine Regeneration durch Requestkriterien (u.a. DPF Rußbeladung) angefragt, so wird durch die stetige Überwachung der Releasegrößen (z.B. Drehzahl, Last) ein günstiger Betriebspunkt abgewartet, um die Regeneration zu starten. Beendet wird die Regeneration, wenn die Bedingungen im Submodell „Stop“ erfüllt sind. Dies kann geschehen, falls das Rußbeladungsziel erreicht ist oder ein bestimmtes zeitliches oder räumliches Limit überschritten wurde. Darüber hinaus werden noch Parameter wie Kühlwassertemperatur, Kraftstoffverbrauch und Umgebungsdruck und -temperatur überwacht.

Das Ziel der prädiktiven DPF Regenerationsstrategie ist es, so wenige Regenerationen wie möglich durchzuführen. Ein großes Potenzial bietet z.B. das Vermeiden von Regenerationsabbrüchen und dem damit verbundenen erneuten Aufheizen des Abgasstrangs. Liegt ein Request für eine DPF Regeneration vor, so müssen die für eine Regeneration relevanten Bereiche des zukünftigen Fahrprofils herausgefiltert werden. Hierbei sind vor allem die Abgastemperatur vor dem DPF und der Kraftstoffmehrerverbrauch als bedeutende Releasegrößen zu untersuchen. Ein Betriebszustand ist dann günstig, wenn die Differenz der Abgastemperatur zwischen Normal- und Regenerationsbetrieb möglichst klein ist. Allgemein gilt, je höher der Motorleistungswunsch ist, desto höher ist die Abgastemperatur. Vorausgesetzt, dass eine hohe Abgastemperatur direkt mit der erhöhten Geschwindigkeit des Fahrzeugs korreliert, kann diese als ein Hauptkriterium für die Auslösung einer DPF Regeneration genutzt werden. Es wird der Günstigkeitswert ( $G$ ) für die vorliegende Untersuchung definiert:

$$G = \begin{cases} v \geq v_{\text{krit}} & G(t_n) = G(t_{n-1}) + 1 \\ v < v_{\text{krit}} & \begin{matrix} G(t_{n-1}) \geq 0 & G(t_n) = G(t_{n-1}) - 2 \\ G(t_{n-1}) < 0 & G(t_n) = G(t_{n-1}) + 0 \end{matrix} \end{cases}$$

Die kritische Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{\text{krit}}$  wird nach mehreren Optimierungsschleifen auf 105 km/h festgelegt.

### 3.2.5.2 Ergebnisse

Die prädiktive Regenerationsstrategie stützt sich bei der Planung der Regeneration auf Daten der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft. Es wurden Simulationen für verschiedene Prädiktionshorizonte unter Anwendung des entwickelten Günstigkeitswertes durchgeführt. In Abbildung 3-10 ist ein Vergleich zwischen konventioneller und prädiktiver Strategie für eine festgelegte RDE Route dargestellt. Der wesentliche Unterschied ist der Beginn der DPF Regeneration. Bei der konventionellen Strategie startet diese, sobald die Freigabevorgaben erfüllt werden, während die prädiktive Strategie auch den Günstigkeitswert innerhalb des Prädiktionshorizonts prüft. Der erste Zeitabschnitt wird als geeignet für die DPF Regeneration identifiziert. In diesem Abschnitt erhöht sich der Günstigkeitswert monoton über den größten Zeitraum und die Freigabevorgaben sind erfüllt. Abbildung 3-11 zeigt darüber hinaus, dass mit steigendem Prädiktionshorizont, die Wahrscheinlichkeit steigt abgebrochene Regenerationsfälle zu vermeiden, welche den Kraftstoffverbrauch erhöhen. Im Fall eines Prädiktionshorizonts von bis zu 30 min kann der Gesamtverbrauch im gegebenen Zyklus um bis zu 5,5 % reduziert werden. Im WLTC wird mit der gleichen Herangehensweise der Ki Faktor im Vergleich zum konventionellen Fall um 1,6 % reduziert wird. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-11 dargestellt.

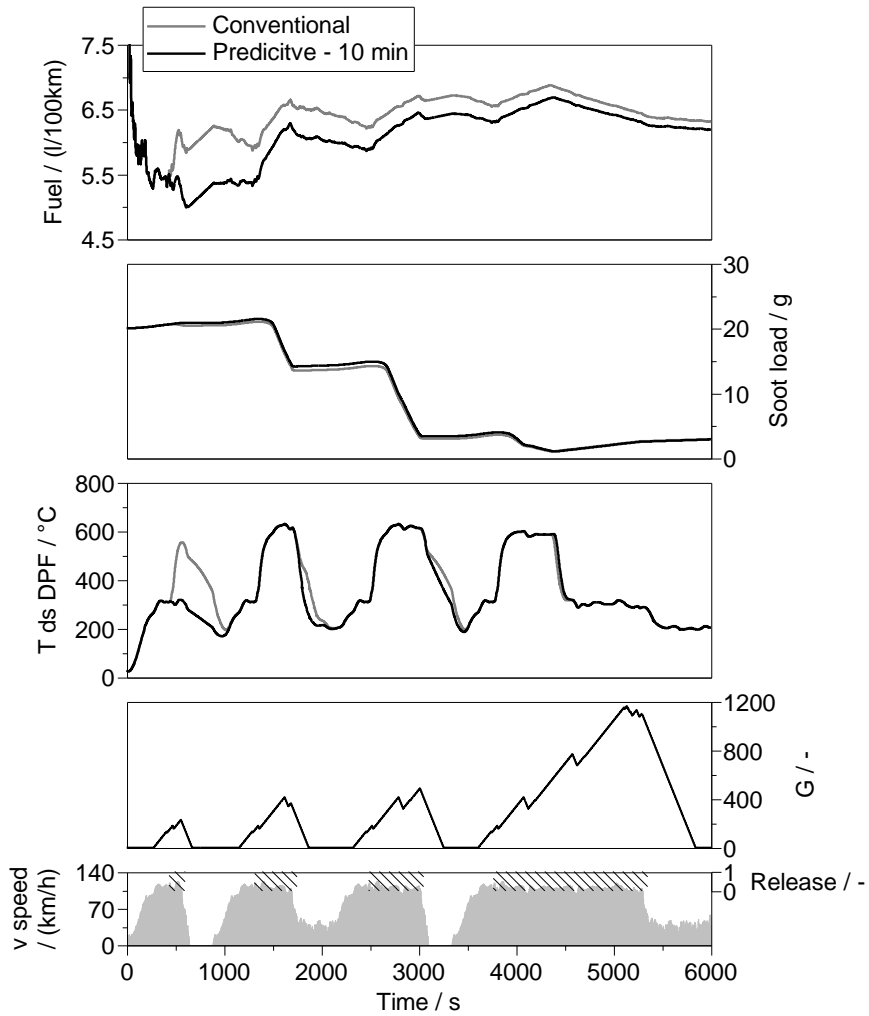


Abbildung 3-10: Konventionelle und prädiktive Regelung in einem RDE-Zyklus

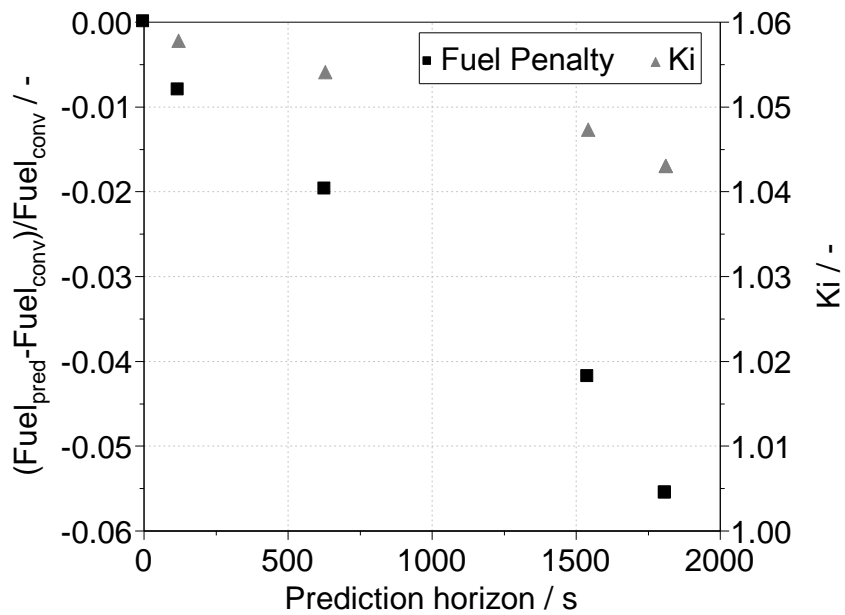


Abbildung 3-11: Einsparpotenzial in Abhängigkeit des Prädiktionshorizonts

### 3.2.6 Zusammenfassung und Fazit

Der Einfluss von „Predictive Driving“ wurde für unterschiedliche Prädiktionshorizonte und Systeme untersucht. Für einen kurzen Prädiktionshorizont wurde die Ladedruckregelung eines Dieselmotors betrachtet. Hierbei war der Ansatz die Totzeiten des Systems mithilfe prädiktiver Informationen zu kompensieren. Es zeigte sich im WLTC Testzyklus, dass die Rußemissionen um bis ca. 5 % reduziert werden konnten. Die Einsparungen konnten für eine Vorlaufzeit von ca. 1 s bei vergleichbaren NO<sub>x</sub>-Emissionen und gleichem Kraftstoffverbrauch realisiert werden. Für einen mittleren Prädiktionshorizont wurden die Regenerationsevents eines NSK untersucht. Mit Hilfe von „Predictive Driving“ konnte das Abbrechen von DeNO<sub>x</sub>-Phasen verhindert werden. Hierdurch ergab sich eine Senkung des Kraftstoffmehrverbrauches bis ca. 3 % bei gleicher DeNO<sub>x</sub>-Effizienz. Die Untersuchung konnte zusätzlich aufweisen, dass für eine Nutzung des „Predictive Driving“ im urbanen Gebiet der benötigte Prädiktionshorizont ein limitierender Faktor ist. Für große Prädiktionshorizonte wurde die Regenerationsstrategie des Dieselpartikelfilters mit Hinsicht auf den Kraftstoffverbrauch optimiert. Der abschließende Vergleich von konventioneller und prädiktiver Strategie hat die Erwartung bestätigt, dass der Gesamtkraftstoffverbrauch mit steigendem Prädiktionshorizont sinkt. Bei dem hier verwendeten maximalen Horizont von 30 min liegt das über Partikelbeladungs- und Regenerationsbetrieb gemittelte, streckenbezogene Kraftstoffeinsparpotenzial im Vergleich zur konventionellen Strategie bei 1,63 %. Der Fokus der weiteren Arbeiten wird auf dem Luftpfad liegen, da hierfür nur geringe bis maximal mittlere Prädiktionshorizonte benötigt werden, welche über die Car2X-Kommunikation dargestellt werden können.

### 3.3 Entwicklung und Aufbau der elektronischen Hardwarekomponenten

Das Online Calibration Tool (OCT) der VEMAC bot bereits die Möglichkeit, über verschiedene Kalibrierschnittstellen auf Steuergeräte zuzugreifen und dort Daten zu lesen und zu modifizieren. Zur Integration der eigenen Position und der Positionsdaten anderer Verkehrsteilnehmer und Infrastruktorknoten in die Regelstrategien der Motorsteuerung können diese vorhandenen Schnittstellen verwendet werden. Da das OCT bisher noch keine Möglichkeit zum Senden und Empfangen von Car2X-Daten besaß, musste die bestehende Hardware erweitert werden. Neben dem Car2X-Kommunikations-Modul waren dazu noch weitere Komponenten erforderlich, welche die von den Kommunikationsprotokollen vorausgesetzten Daten erfassen können. Im Rahmen des Projektes wurden die im Folgenden vorgestellten Komponenten evaluiert und auf einer neuen Hardware integriert.

#### 3.3.1 CPU Modul

Die OCT Software ist weitestgehend plattformunabhängig und konnte bisher erfolgreich auf verschiedenen embedded-Linux Hardwareplattformen eingesetzt werden. Als geeigneter Kompromiss aus Leistungsfähigkeit, Preis und Flexibilität konnten Single-Board Computer auf Basis von ARM SoC identifiziert werden. Das OCT setzt ein CPU-Modul der Firma Variscite ein, welches mit einem i.MX6 ARM Prozessor mit vier Rechenkernen und bis zu 4GB RAM ausgestattet ist (vgl. Abbildung 3-12). Das Board konnte bereits für die Vorgängerversion des OCT erfolgreich eingesetzt werden und bietet ausreichend Schnittstellen, um die zusätzlichen Sensoren und Kommunikationsmodule anschließen zu können. Der Prozessor besitzt ausreichend Leistung, um neben der OCT Software weitere Anwenderspezifische Software auszuführen.



Abbildung 3-12 Variscite VAR-SOM-MX6

### 3.3.2 GPS-Empfänger und Beschleunigungssensor

Die wichtigsten Daten, die von Car2X benötigt werden, sind Positionsdaten. Diese werden von jedem Fahrzeug zyklisch über sogenannte *Cooperate Awareness Messages (CAM, vgl. Kapitel 3.1.1)* versendet, um so von anderen Fahrzeugen erfasst werden zu können. Die Fahrzeugposition wird von einem GPS-Chip (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) erfasst und vom Gerät dekodiert.

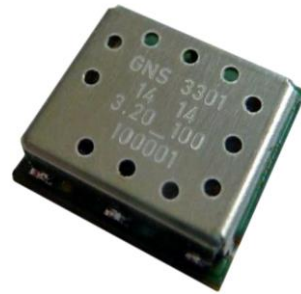


Abbildung 3-13 - GPS-Modul GNS 3301

Der GNS 3301 konnte mit Hilfe eines Evaluation-Kits auf seine Tauglichkeit für den Einsatz im Projekt untersucht werden. Der Chip kommuniziert über ein UART mit dem OCT.

Neben dem GPS können die Positionsdaten durch weitere Sensoren verbessert werden. Hierzu sieht das Hardwarekonzept die Integration einer Inertial Measurement Unit (IMU) vor, welche Beschleunigungsdaten in den drei translatorischen Achsen sowie in den drei rotatorischen Achsen erfasst. Für die OCT Hardware wurde ein Bosch BMI 055 Chip, der Gyroskop und Beschleunigungssensor bietet, gewählt. Der Chip konnte erfolgreich im Versuchsaufbau an die OCT-Hardware angebunden und auf Eignung für den Einsatzzweck überprüft werden. Der Sensor ist über die I<sup>2</sup>C Schnittstelle an das OCT angebunden.

### 3.3.3 Car2X Hardware

Car2X-Kommunikation stellt eine vergleichsweise junge technologische Entwicklung dar. Die damit verbundenen Standards sind noch nicht lange veröffentlicht und zudem noch nicht finalisiert. Die Verfügbarkeit entsprechender Chipsätze ist demzufolge bisher noch nicht sehr hoch. Für das Projekt konnten erste Entwicklungsversionen eines Car2X Moduls der Firma U-Blox, mit einem Chipsatz von NXP / Cohda Wireless bezogen und für erste Tests verwendet werden. Der Car2X Kommunikationsstandard 802.11p basiert auf der Familie der WLAN-Standards, unterscheidet sich aber im verwendeten Frequenzband und in der Art des Verbindungsaufbaus mit anderen Teilnehmern.

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist das Car2X Modul auf einem Development-Board gezeigt, welches für die Inbetriebnahme der Hardware und Implementierung der Software eingesetzt wurde. Das Modul ist per USB mit dem OCT verbunden und wird auf Betriebssystemebene ähnlich wie ein herkömmliches Netzwerkgerät angesprochen.



Abbildung 3-14 - Car2X-Modul U-Blox THEO P1 mit Transceiver von Cohda Wireless

### 3.3.4 Bordnetztaugliche Spannungsversorgung

Da das Gerät im Fahrzeug eingesetzt und über das Fahrzeugbordnetz versorgt werden soll, muss die interne Spannungsversorgung den speziellen Anforderungen an Elektronik im Kraftfahrzeug genügen. Neben den erforderlichen Filtern zur Transientenunterdrückung wurde das OCT zusätzlich mit einem internen Lithium-Ionen Akku versehen. Dieser wird benötigt, um auch bei Spannungseinbrüchen, welche unter anderem in der besonders emissionsrelevanten Startphase des Verbrennungsmotors häufig vorkommen, einen unterbrechungsfreien Betrieb im Fahrzeugnetz zu gewährleisten. Zusätzlich zur Verwendung als „Versorgungspuffer“ kann das Gerät darüber hinaus für einen begrenzten Zeitraum autark aus dem Akku versorgt werden.

Verwendet wird eine Lithium-Eisenphosphat ( $\text{LiFePO}_4$ ) Zelle. Diese wird während des Bordnetzbetriebs über eine integrierte Ladeelektronik geladen. Für das Lademanagement (insbesondere auch zum Schutz vor schädlicher Tiefenentladung) wird das IC LTC4015 der Firma Linear Technology eingesetzt. Neben dem reinen Lademanagement der Lithium-Ionen-Zelle bietet dieser Chip die Möglichkeit, den aktuellen Ladestand des Akkus zu ermitteln und über ein I<sup>2</sup>C-Interface dem OCT zu Verfügung zu stellen.

Die vollständige Spannungsversorgungstopologie ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Abbildung 3-15 dargestellt.

Direkt am Eingang des OCT arbeitet der Lademanagement-IC. Dieser kann zum einen die Eingangsspannung aus dem Bordnetz durchschalten, oder aber, wenn keine Spannung am Eingang anliegt, automatisch auf Akkubetrieb umschalten. Die Spannung des Akkus liegt in einem Bereich von 3,1 V bei niedrigem Ladestand und der Ladeschlussspannung von 3,65 V. Die maximale Eingangsspannung des Systems beträgt 35 V. Aus dem Eingangsspannungsbereich von 3,1 V – 35 V regelt ein Buck-Boost-Converter eine stabile 5 V Spannung. Da nicht alle Komponenten direkt aus den 5 V versorgt werden können, sind weitere Schaltregler und Low-Dropout-Linearregler nachgeschaltet, die 3,3 V, 3 V und 1,8 V Versorgungen bereitstellen.

Da der Boost-Converter zum Starten eine Spannung von mindestens 4 V benötigt, ist zum Booten aus der Batterie eine zusätzliche Ladungspumpe erforderlich, welche als Spannungsdoppler verschaltet und über den Akku gespeist wird.

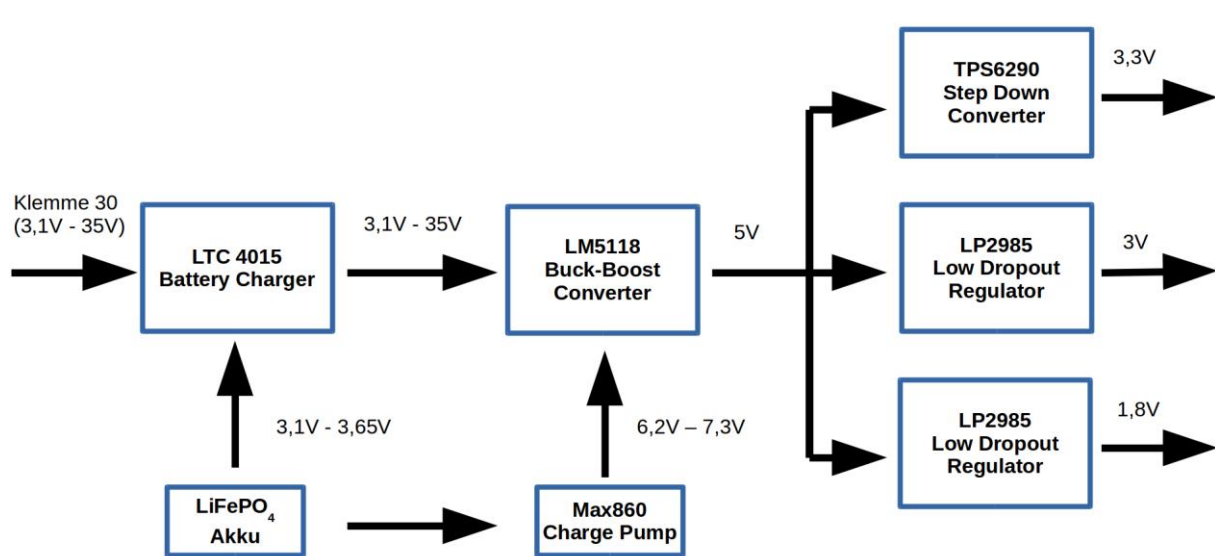


Abbildung 3-15 Topologie der Spannungsversorgung des OCT

### 3.3.5 Hardwareaufbau

Die oben genannten Komponenten wurden nach erfolgreicher Evaluierung auf einer eigenentwickelten Platine mit dem Variscite CPU-Board verbunden. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigen den Platinentwurf.



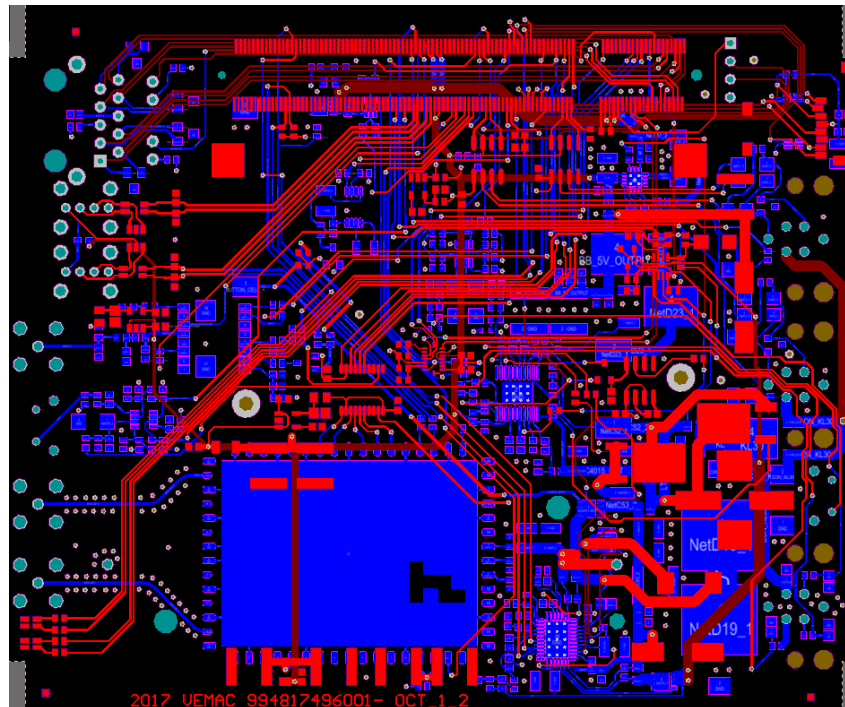


Abbildung 3-16 Layout-Entwurf der OCT Platine

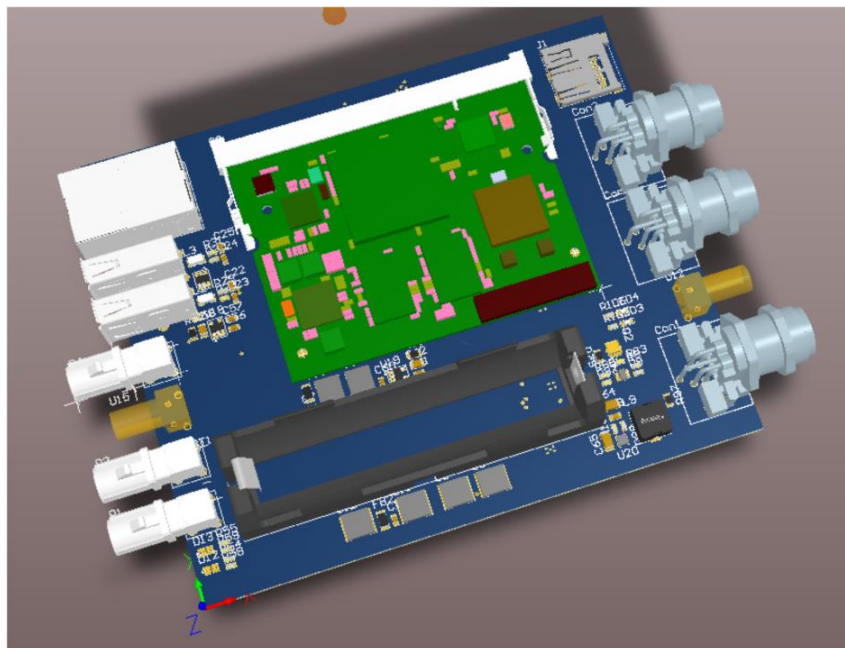


Abbildung 3-17 3D-Modell der Platine

Die gefertigte Platine wurde bestückt und in Betrieb genommen. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt einen teilbestückten Prototyp. Das fertige in einem Aluminium Stranggussgehäuse eingebaute OCT ist in Abbildung 3-19 zu sehen.





Abbildung 3-18 Teilbestückter Prototyp



Abbildung 3-19: Fertiges OCT im Gehäuse

## 3.4 OCT Basissoftware

### 3.4.1 Betriebssystem

Die OCT Software ist plattformunabhängig und kann sowohl unter Windows wie auch unter Linux eingesetzt werden. Auf der OCT Hardware wird als Entwicklungs-Betriebssystem ein Linux auf Basis der Debian GNU/Linux Distribution eingesetzt. Um die anwendungsspezifische Peripherie verwenden zu können, wurden sowohl der Bootloader, als auch der Kernel angepasst. Das Betriebssystem kann von einem auf dem CPU-Board vorhandenen eMMC Chip, oder von einer externen SD-Karte gestartet und über ein serielles Terminal oder die Netzwerkschnittstelle bedient werden.

### 3.4.2 Erweiterung der Basissoftware mit den XCP/CCP Protokollen

Die OCT-Basissoftware unterstützte bisher das XCP Protokoll für die Kalibrierung von Steuergeräten. Der Vorgänger des XCP Protokolls, das CCP Protokoll wird jedoch weiterhin bei vielen gängigen Steuergeräten für den Kalibrierzugang verwendet. Da auch die im Projekt verwendete EDC17 nur einen CCP Zugang bereitstellt, wurde die OCT-Software um das CCP Protokoll erweitert. Da sich die beiden Protokolle zum einen stark ähneln, und zum anderen der modulare Aufbau der OCT Software von vorneherein auf die Ergänzung weiterer Kommunikationsprotokolle ausgelegt war, konnte die Implementierung erfolgreich durchgeführt werden. Die erfolgreiche CCP Kommunikation konnte sowohl an einer EDC17 im Laborversuch als auch im Fahrzeugversuch verifiziert werden.

### 3.4.3 Integration der neuen Hardwarekomponenten

Die neuen Hardwarekomponenten wurden softwareseitig wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gezeigt an die OCT-Serveranwendung angebunden.

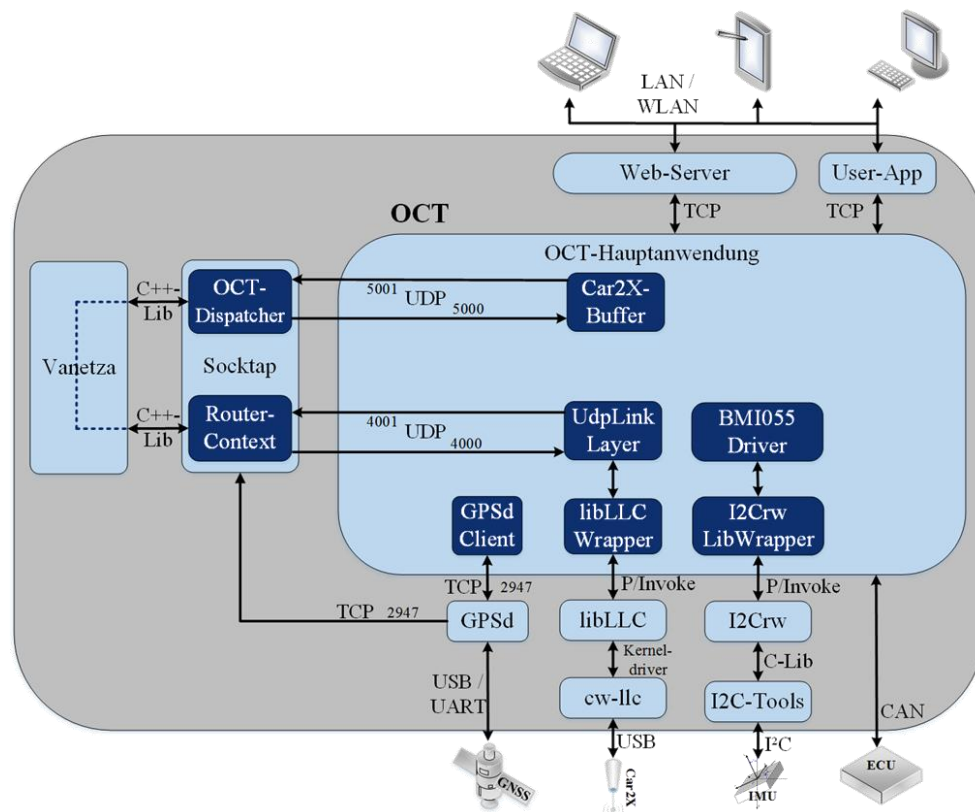


Abbildung 3-20: Softwarearchitektur zur Anbindung der Hardware an das OCT

Die IMU liefert die Bewegungsdaten direkt über einen eigenentwickelten Treiber und stellt diese dem OCT zur Verfügung. Der GPS-Empfänger überträgt die empfangenen Positionsdaten über eine serielle Schnittstelle. Die Rohdaten sind im NMEA 0183-Format (National Marine Electronics Association) enkodiert. Dieses Format dient der Kommunikation von GPS-Hardware mit anderen Geräten wie PCs, Smartphones oder der hier eingesetzten embedded Plattform. Die Sensorkommunikation und Dekodierung der Daten erfolgt mit dem Linux-Systemdienst *GPSd*. Anwendungen können die dekodierten Positionsdaten über eine Socket-Schnittstelle vom *GPSd* abfragen. Diese Schnittstelle wird von der OCT Application benutzt um die Positionsdaten zu empfangen und dem Datenpool hinzuzufügen.

Das Car2X-Modul THEO-P1 präsentiert sich dem Linux-Betriebssystem als Netzwerk-Schnittstelle, benötigt allerdings die Einbindung diverser Treibersoftware und Firmware-Dateien des Herstellers. Die Firmware muss bei jedem Systemstart in den Chip geladen werden. Der Gerätetreiber liegt in Form einer C-Bibliothek vor und wurde mit Hilfe eines Wrappers in die in C# implementierte OCT-Software eingebunden. Die Netzwerkschnittstelle deckt nur die Rohdatenübertragung ab. Die zu übertragenden Daten müssen zunächst in ein definiertes Format gebracht werden. In Europa ist das Protokoll für die Car2X Datenübertragung im Standard ITS-G5 (Intelligent Transport Systems) des ETSI (European Telecommunications Standards Institute) definiert. Für die De- und Encodierung der Daten wurde die Open-Source Bibliothek ‚Vanetza‘ eingesetzt, welche einen ETSI-ITS-G5 kompatiblen Protokoll-Stack implementiert.

Empfangene Rohdaten werden durch die OCT-Software empfangen und zum „Entpacken“ der Daten an die Vanetza-Bibliothek weitergeleitet. Die dekodierten Informationen werden dann dem OCT bereitgestellt. Zum Versenden der eigenen

Nachrichten werden diese mit Hilfe der Vanetza Bibliothek enkodiert und über den Wrapper an das Car2X-Modul gesendet.

### 3.4.4 Simulink/OCT-Schnittstelle

Simulink bietet die Möglichkeit, Programmabläufe in einer visuellen Repräsentation zu modellieren, zu simulieren, und ausführbaren Code daraus zu generieren. Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, wurde im Rahmen des Projektes eine Simulink-Schnittstelle geschaffen, die die Verwendung der Daten aus dem OCT-Datenpool und den Zugriff auf Kalibrierwerte angeschlossener Steuergeräte in einem Simulink-Modell ermöglicht (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

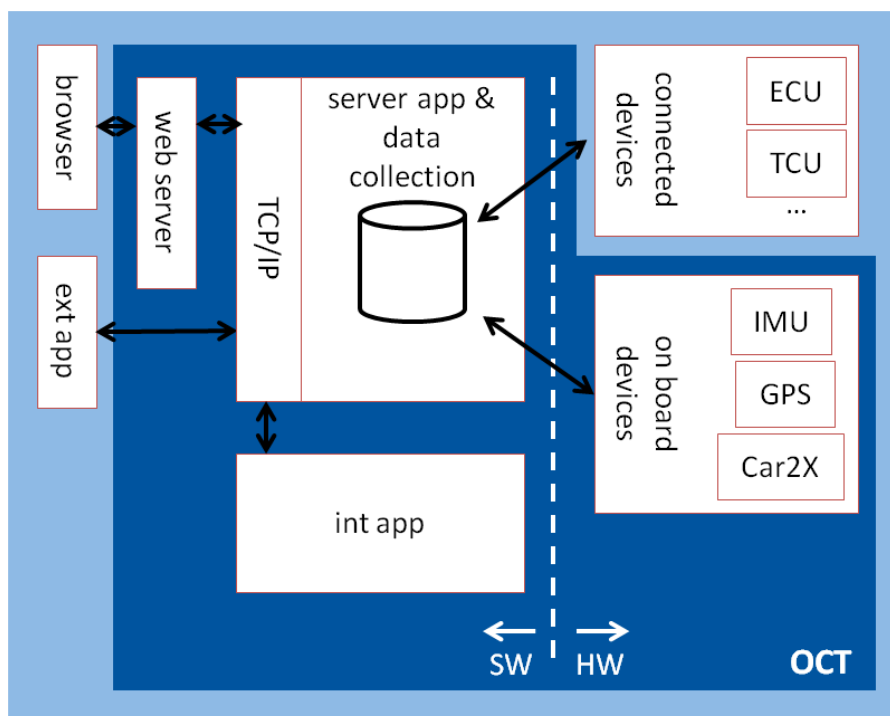


Abbildung 3-21 OCT Software-Architektur

Um beispielsweise die in Kapitel 3.2.3 und 3.2.4 vorgestellten Strategien mit Hilfe eines Simulink-Modells umzusetzen, werden als Quelle verschiedene Fahrzeugdaten aus der ECU sowie die Sensordaten von Car2X, Beschleunigungssensordaten und GPS-Daten benötigt. Diese Eingangsdaten werden im Simulink-Modell verarbeitet, um die geforderten Prädiktionen daraus abzuleiten, und die optimalen Betriebsparameter der Motorsteuerung auf Grundlage dieser Prädiktionsdaten zu berechnen. Die Parameter werden im nächsten Schritt über einen Kalibrierzugriff in das Motorsteuergerät geschrieben.

Aus dem fertigen Modell wird mit Hilfe des Simulink Coders Quellcode generiert (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), welcher entweder für die OCT-Plattform kompiliert und intern als eigener Prozess neben dem OCT Server auf der OCT Hardware ausgeführt werden (vgl. „int app“ in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), oder auf einer externen Plattform ausgeführt werden kann (vgl. „ext app“ in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

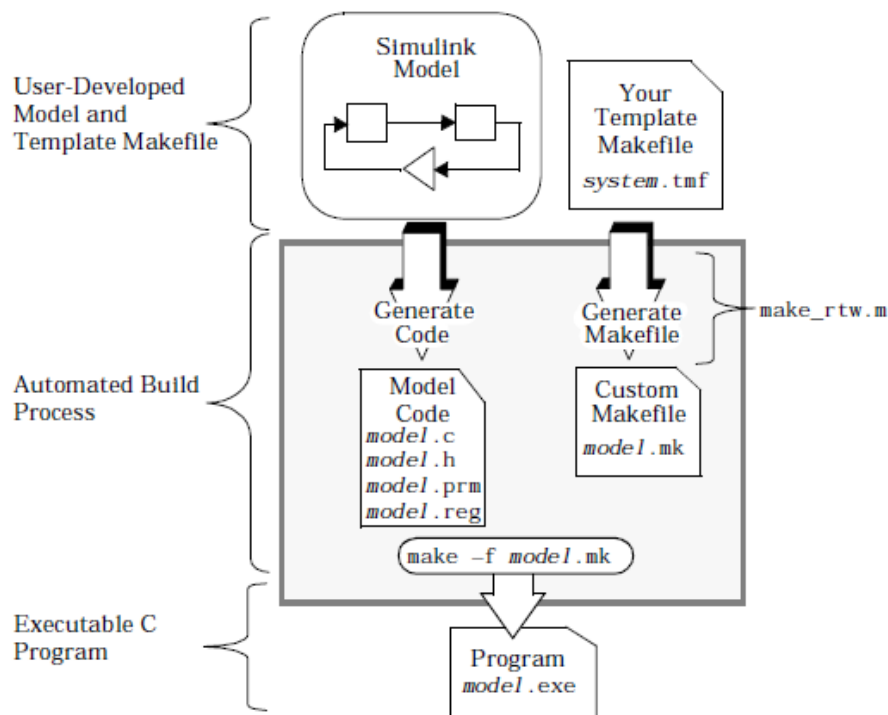


Abbildung 3-22 Schritte der Codegenerierung (Quelle: MATLAB Dokumentation)

Abhängig davon, ob der Code später auf dem OCT oder auf einem externen Gerät ausgeführt werden soll, muss ein jeweils passender Compiler verwendet werden. Für die Ausführung des Codes auf dem OCT wurden die notwendigen Bibliotheken, Templates und Konfigurationen für den Codegenerator erstellt und auf dem Linux-System des OCTs eine Build-Umgebung eingerichtet, mit der der Quellcode auf dem OCT in ausführbaren Code übersetzt werden kann.

### 3.4.5 Simulink-Bibliothek

Für den Zugriff auf die OCT-Daten im Simulink-Modell wurde die Standard-Simulink-Bibliothek um OCT-Spezifische „Blöcke“ ergänzt. Dabei wird zwischen Lese- und Schreibzugriff auf die Daten im OCT Datenpool unterschieden (Quelle und Senke). Da die Datenschnittstelle des OCT unabhängig von der Quelle der Daten eine einheitliche Schnittstelle bietet, sind hierbei lediglich ein Block für das Lesen von Datenwerten und ein Block für das Schreiben erforderlich. Mit Hilfe dieser Blöcke ist sowohl der Zugriff auf Skalare Daten, als auch der Zugriff auf mehrdimensionale Größen, also Kennlinien und Kennfelder möglich.

Simulink erlaubt das Design von anwenderspezifischen Blöcken mit Hilfe sogenannter Simulink S-Functions. Für die Erstellung einer S-Function sind eine Reihe von Code- und Metadateien zu erzeugen, welche die Funktionalität des neuen Blocks beschreiben. Hierbei wird unterschieden zwischen Code, der für die Simulation und semantische Überprüfung des Simulink-Modells verwendet wird, und Codetemplates, welche bei der Codegenerierung in den erzeugten Quellcode einkopiert werden. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** stellt den Entwicklungs- und Anwendungsprozess von S-Functions dar.

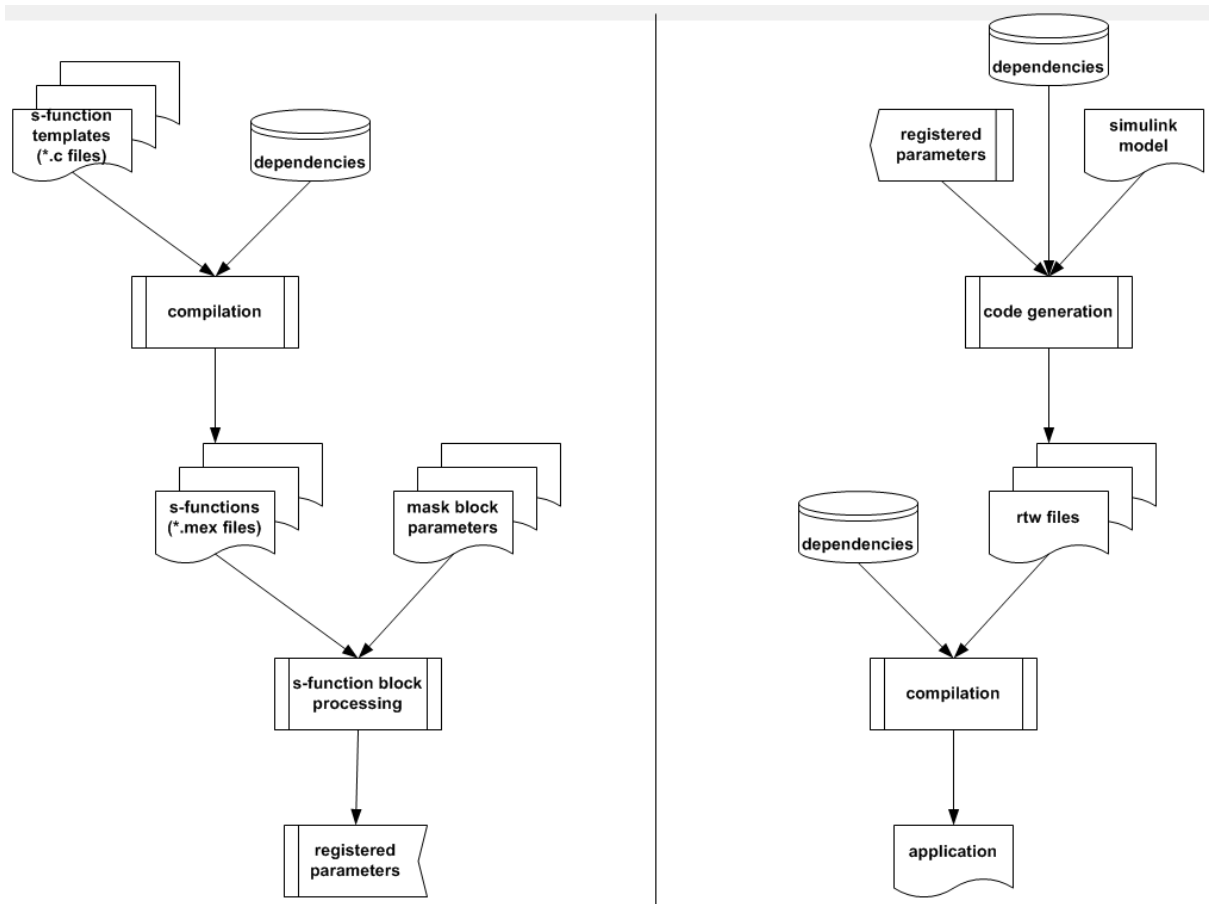


Abbildung 3-23 Links: S-Function-Entwicklungsprozess, Rechts: S-Function“-Anwendungsprozess (Quelle: MATLAB Dokumentation)

Entsprechend der oben dargestellten Prozesse wurden ein S-Function-Block zum Lesen (GetObject-Block) und einer zum Schreiben (SetObject) von Werten aus dem OCT-Daten-Pool entwickelt. Die Blöcke sind in Simulink parametrierbar, so dass der Objektpfad und die Dimension der gewünschten OCT Daten eingestellt werden können.

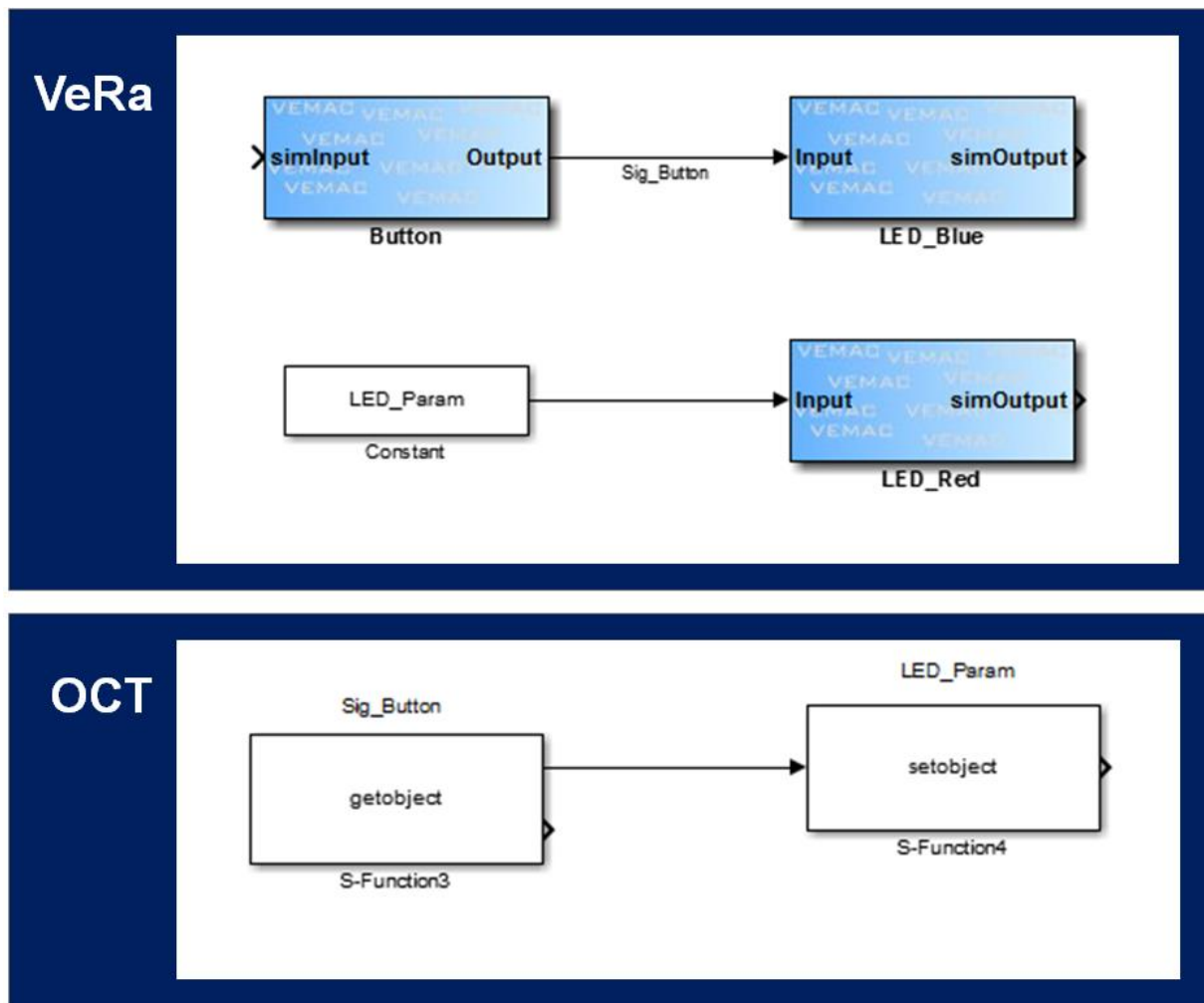


Abbildung 3-24 Anwendung der OCT Simulink Schnittstelle

**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt ein vereinfachtes Anwendungsbeispiel der neuen GetObject und SetObject Blöcke:

Im oberen Ausschnitt ist ein Modellausschnitt gezeigt, wie er in einem Steuergerät zu finden wäre. Das gezeigte Modell läuft auf einem VeRa Steuergerät der Firma VEMAC und das OCT kann über die XCP-Schnittstelle auf die Kalibrierdaten des Modells zugreifen. Das Modell implementiert ein einfaches Beispiel, bei dem als Quelle der Status eines Tasters (Block „Button“) eingelesen und auf einer LED (Block „LED\_Blue“) ausgegeben wird. Zusätzlich wird eine zweite LED (Block „LED\_Red“) angesteuert, jedoch über eine Kalibrierkonstante. Dies bedeutet, dass die rote LED abhängig vom Konstantenwert dauerhaft ein- oder ausgeschaltet ist.

Im unteren Ausschnitt ist ein Modell gezeigt, das auf dem OCT ausgeführt wird, und mit Hilfe der GetObject und SetObject-Blöcke auf die Konstanten und Signale des Steuergerätemodells zugreift. Das gezeigte Modell demonstriert, wie das Tastersignal aus dem obigen Modell über den getObject Block importiert und über den setObject Block in die LED\_Param Konstante in das Steuergerät zurückgeschrieben wird. Als Resultat wird die rote LED ebenso wie die blaue LED durch Betätigung des Tasters ein- und ausgeschaltet.

Obiges Beispiel zeigt vereinfacht, wie mit Hilfe des Simulink-Modells auf dem OCT durch sogenanntes „Bypassing“ das Verhalten des Steuergerätes modifiziert werden

kann, ohne die eigentliche Programmierung des Steuergerätes zu ändern. Auf ähnliche Art und Weise können die Parameter eines Motorsteuergerätes, wie z.B. Turboladerdruck oder ähnliche Stellgrößen beeinflusst werden, sofern geeignete Ansatzpunkte in der Steuergerätesoftware vorhanden sind, und eine Kalibrierschnittstelle zur Verfügung steht.

#### 3.4.6 Simulink Bibliothek für die Car2x Schnittstelle

Analog zu den Steuergerätedaten stehen die Car2X Daten ebenfalls über die TCP Schnittstelle des OCT-Servers zur Verfügung (vgl. Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Da es sich bei den Daten die über die 802.11p Schnittstelle empfangen werden um Datencontainer (CAMs und DENMs) handelt, die wiederum aus einer Vielzahl von Fahrzeuginformationen bestehen, müssen diese zur weiteren Verarbeitung in Simulink erst „entpackt“ werden. Zum Dekodieren der Rohdaten wurden weitere Simulink Blöcke erstellt, mit denen die für die Anwendung relevanten Daten extrahiert werden können.



### 3.5 Entwicklung der Algorithmen zur prädiktiven Motorregelung

#### 3.5.1 Überblick Regelungsmodell

Die Ergebnisse aus der Simulation zeigen, dass die Betrachtung des Luftpfades des Antriebsstrangs geeignet ist, um die Informationen des Car2C und Car2X zu verwenden. Aufgabe des Regelungsmodells ist es, eine Vorhersage des Fahrzustandes für die nachfolgenden Sekunden zu treffen und dem Steuergerät einen Echtzeitdatensatz zur Kalibrierung des Luftpfades für eine Emissionsreduktion, insbesondere Ruß, bereitzustellen.

Das Regelungsmodell, welches in Abbildung 3-25 dargestellt ist, besteht aus zwei Teilen:

- Das Modul zur Fahrzeuggeschwindigkeitsvorhersage konvertiert die Signale des OCTs zur Vorhersage des Geschwindigkeits- ( $V_{VehPred}$ ) und Schaltprofils ( $i_{GearPred}$ ).
- Der prädiktive Regelalgorithmus für den Luftpfad berechnet basierend auf der Geschwindigkeitsprädiktion einen Soll-Ladedruck und die Korrektur der AGR Rate zur Minimierung von Emission und Kraftstoffverbrauch.

Die Software wird in Simulink implementiert und in der Simulationsumgebung aus Abschnitt 9 validiert.

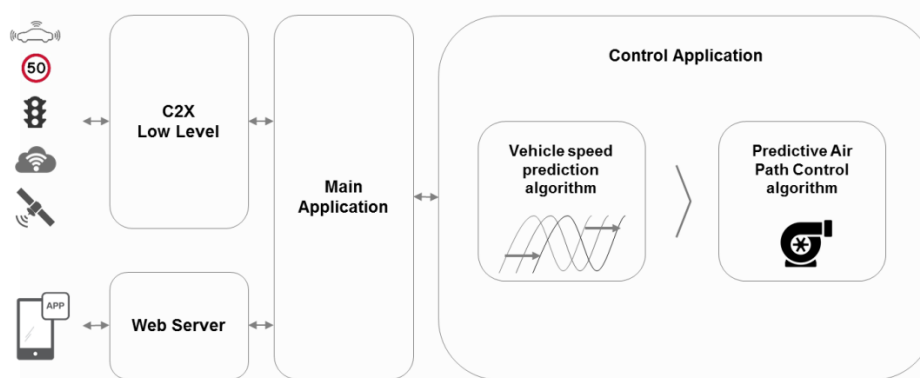


Abbildung 3-25: Regelungsmodell blockiert den Überblick

#### 3.5.2 Prädiktion der Fahrzeuggeschwindigkeit

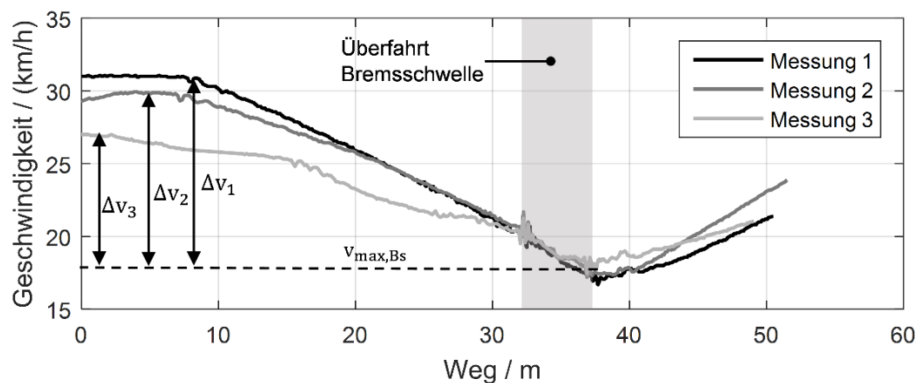
Zur Beschreibung von Verkehrszuständen sind in der Verkehrsdynamik verschiedene Modellklassen bekannt. Sie werden anhand ihres Abstraktionsniveaus in mikroskopische, mesoskopische und makroskopische Modelle unterschieden [Hel97]. Für die Beschreibung von Geschwindigkeitstrajektorien einzelner Verkehrsteilnehmer eignet sich die Klasse der mikroskopischen Modelle. Die bekanntesten Vertreter dieser Klasse sind das Wiedemann-Modell [Wie73], das Intelligent Driver Model [THH00] und das Gipps-Modell [Gip81]. Alle genannten Modelle haben gemein, dass ihre Stärke in der Beschreibung des Folgeverhaltens von Fahrzeugen liegt und hierbei bereits gute Übereinstimmungen mit dem Realverhalten aufweisen. Bei freier Fahrt zeigen diese Modelle jedoch meist ein unrealistisches Beschleunigungsverhalten

[TK10] und sind somit nicht ohne Adaption für einen Prädiktionsalgorithmus geeignet. Da das Gipps-Modell aufgrund seiner Modellgleichungsstruktur gute Voraussetzungen für eine solche Erweiterung besitzt, wird dieses Modell für die weiteren Untersuchungen verwendet.

Das Gipps-Modell beruht auf dem Prinzip der Unfallfreiheit. Die Bedingung der Unfallfreiheit ist mittels einer maximalen, von Abstand und Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs abhängigen, „sicheren Geschwindigkeit“  $v_{k, \text{safe}}$  formuliert. Darüber hinaus werden die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit  $v_{k, \text{max}}$  und die maximale Beschleunigung  $a_{k, \text{max}}$  bzw. die maximale Verzögerung  $b_{k, \text{max}}$  berücksichtigt. Somit folgt die Grundgleichung des Gipps Modells:

$$v_{k+1} = \max\{\min\{v_k + a_{k, \text{max}} \cdot (t_{k+1} - t_k), v_{k, \text{max}}, v_{k, \text{safe}}\}, v_k - b_{k, \text{max}} \cdot (t_{k+1} - t_k)\}$$

Im Standardmodell sind sowohl die maximale Beschleunigung und Verzögerung als auch die maximale Geschwindigkeit Konstanten. Um weitere Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsgrenzen zu berücksichtigen, werden diese im Folgenden durch empirische Zusammenhänge zeit- und situationsabhängig ersetzt. Hierzu wurden zunächst mit einem Versuchsfahrzeug mehrere innerstädtische Messfahrten durchgeführt. Das Versuchsfahrzeug wurde zu diesem Zweck mit einem GPS-Sensor und einer Kamera ausgestattet, um die Fahrzeugposition und die Verkehrssituation zu rekonstruieren. Während der Messfahrten wurden zusätzlich Fahrzeugdaten vom CAN-Bus, wie zum Beispiel die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit und -beschleunigung, mitprotokolliert. Die Auswertung der Messdaten hat gezeigt, dass neben den gesetzlichen Tempolimits  $v_{\text{max, TL}}$  u.a. Kurven  $v_{\text{max, K}}$  und Bremsschwellen  $v_{\text{max, Bs}}$  weitere ortsabhängige Geschwindigkeitslimits darstellen. In Abbildung 3-26 sind exemplarisch für die Überfahrt einer Bremsschwelle drei Geschwindigkeitsverläufe über den Weg aufgetragen.



**Abbildung 3-26: Ausgewählte Geschwindigkeitsverläufe für die Überfahrt über eine Bremsschwelle**

Die minimale Überfahrtsgeschwindigkeit ist bei allen drei Messungen nahezu identisch und wird daher als Geschwindigkeitsgrenze im Modell berücksichtigt:

$$v_{k, \text{max}} = f(v_{\text{max, TL}}, v_{\text{max, K}}, v_{\text{max, Bs}})$$

Darüber hinaus konnte für Beschleunigungs- und Verzögerungsmanöver ein Zusammenhang zwischen der Differenzgeschwindigkeit  $\Delta v$  von End- und Startgeschwindigkeit identifiziert werden, welcher in Abbildung 3-27 visualisiert ist.

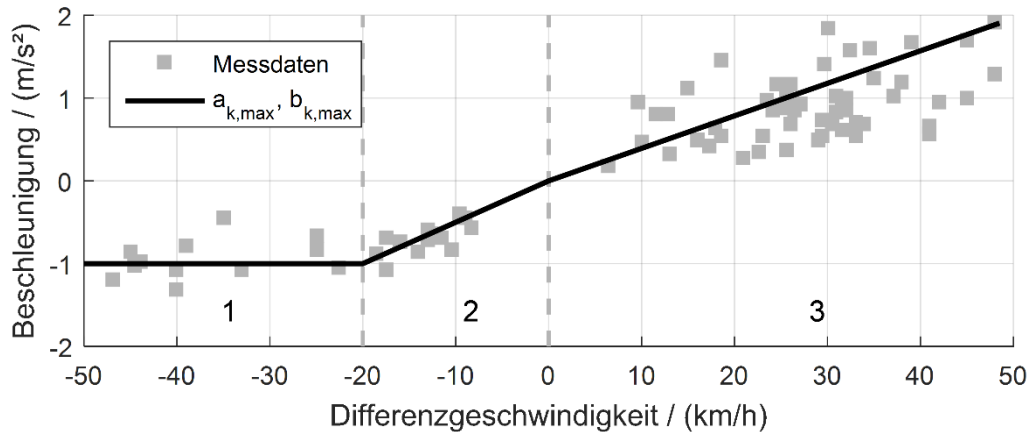


Abbildung 3-27: Darstellung der mittleren Beschleunigung in Abhängigkeit der Differenzgeschwindigkeit

Die Messwerte können in drei Bereiche eingeteilt werden, die jeweils durch einen linearen Zusammenhang approximiert werden. Somit ergibt sich für die maximale Beschleunigung bzw. Verzögerung:

$$a_{k,max} = a_0 \cdot \Delta v, \quad 0 \frac{\text{km}}{\text{h}} \leq \Delta v$$

$$b_{k,max} = \begin{cases} -b_0 \cdot \Delta v, & -20 \frac{\text{km}}{\text{h}} < \Delta v < 0 \frac{\text{km}}{\text{h}} \\ b_{\text{comf}}, & \Delta v \leq -20 \frac{\text{km}}{\text{h}} \end{cases}$$

Anhand des mit diesen Zusammenhängen erweiterten Gipps-Modells, den Informationen aus digitalen Karten und den über Car2X ausgetauschten aktuellen Positionen und Geschwindigkeiten vorausfahrender Verkehrsteilnehmer kann die zukünftige Trajektorie des eigenen Fahrzeugs geschätzt werden.

### 3.5.3 Prädiktiver Regelalgorithmus für den Luftpfad

Abbildung 3-28 stellt eine Übersicht der entwickelten Kontrollstrategie dar, welche durch das Wissen um die Ladedruckforderung im Prädiktionshorizont darauf zielt den gewünschten Ladedruck und den NO<sub>x</sub>-Sollwert zu korrigieren. Die dicken Pfeile repräsentieren einen Vektor an Werten entsprechend der Prädiktionsquantitäten, während die dünneren Pfeile einen Skalarwert darstellen.

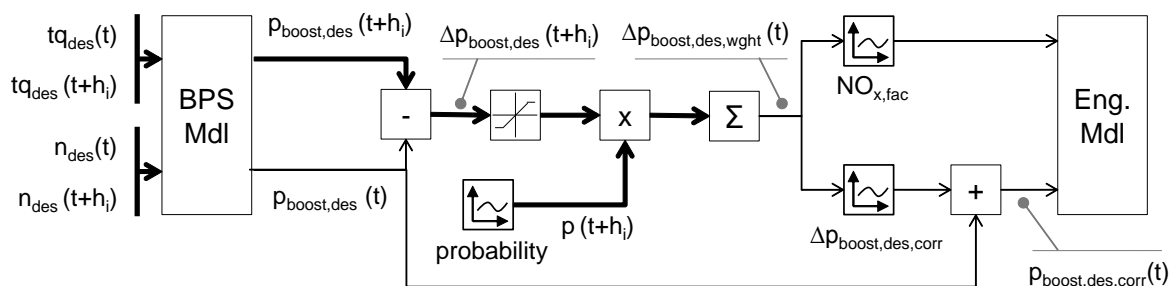


Abbildung 3-28: Regelbasierter Algorithmus für den Luftpfad mittels Prädiktionsinformationen

Der Block des Ladedrucksollwerts (engl. Boost Pressure Set-Point, BPS) verarbeitet die Prädiktionsinformationen, Motordrehzahl und Motorladung zu verschiedenen Schritten innerhalb des Prädiktionshorizonts und stellt den gewünschten Einlassdruck  $p_{boost,des}(t + h_i)$  für die folgenden  $n$  Schritte (für  $i = 1 \dots n$ ). Der BPS liefert außerdem  $p_{boost,des}(t)$  für die aktuelle Zeit. Um  $p_{boost,des}(t + h_i)$  zu ermitteln, zieht der BPS auch andere Informationen, z.B. Umweltbedingungen und Motorkühlungstemperatur, in Betracht. Jedoch wird vermutet, dass diese Quantitäten im Prädiktionshorizont konstant sind. Sobald die Ladedrucksollwerte für die vorausgesagten und tatsächlichen Signale evaluiert sind, erkennt die Steuerung Unterschiede zwischen den Elementen  $p_{boost,des}(t + h_i)$  und dem Strom  $p_{boost,des}(t)$ . Nach der  $\Delta p_{boost,des}(t + h_i)$  Auswertung wird alles unter null außer Acht gelassen:

$$\Delta p_{boost,des}(t + h_i) = \begin{cases} p_{boost,des}(t + h_i) - p_{boost,des}(t), & \Delta p_{boost,des} < 0 \\ 0, & \Delta p_{boost,des} \geq 0 \end{cases}$$

Als nächstes wird ein Wahrscheinlichkeitsvektor eingeführt, um eine nähere und neuerlich wahrscheinliche Vorhersage zeitgleich zu erwägen. Dann wird jedes Element des Vektors mit der zugehörigen Wahrscheinlichkeit multipliziert und zusammen addiert wodurch  $\Delta p_{boost,des,wght}(t)$  bereitgestellt wird:

$$\Delta p_{boost,des,wght}(t) = \sum p(t + h_i) \cdot \Delta p_{boost,des}(t + h_i)$$

wo

$$\sum p(t + h_i) = 1$$

Sobald  $\Delta p_{boost,des,wght}(t)$  evaluiert ist, wird es genutzt, um einen neuen gewünschten Ladedruck  $p_{boost,des,corr}$  zu berechnen und den  $NO_x$ -Sollwert zu korrigieren. Zu diesem Zweck werden zwei Kurven gebraucht. Die erste stellt einen Ausgleich,  $p_{boost,des,corr}(t)$ , welcher zu  $p_{boost,des}(t)$  summiert wird, um es zu korrigieren:

$$p_{boost,des,corr}(t) = p_{boost,des}(t) + f(\Delta p_{boost,des,wght}(t))$$

Der zweite berechnet einen Faktor, um den  $NO_x$ -Sollwert zu berichtigen:

$$NO_{x,fac} = f(\Delta p_{boost,des,wght}(t))$$

Zur Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass die Kurven für den Ausgleich von  $p_{boost,des}(t)$  und für die Korrektur des  $NO_x$ -Konzentrationsollwerts linear sind. Ersteres steigt monoton an, sodass gilt je höher  $\Delta p_{boost,des}(t)$  ist, desto höher ist  $p_{boost,des}(t)$ . Der Kurvenausdruck hängt von  $k_{boost,fac}$  ab, welches die Steigung ändert. Die endgültige mathematische Formel lautet:

$$\Delta p_{boost,des,corr}(t) = k_{boost,fac} \cdot \Delta p_{boost,des,wght}(t)$$

Die zweite Kurve ist als monoton fallend festgelegt. Die Gleichung lautet:

$$NO_{x,fac}(t) = 1 - k_{NOx,fac} \cdot \Delta p_{boost,des,wght}(t)$$

Die Simulationsergebnisse im nächsten Abschnitt wurden durch eine Anpassung der  $k_{boost,fac}$  und  $k_{NOx,fac}$  Werte ermittelt.

### 3.5.3.1 Offline-Auswertung des regelbasierten Algorithmus

Die Randbedingungen und das Motorenmodell, welche für die Auswertung des regelbasierenden Algorithmus genutzt wurden, sind in Abschnitt 3.2 beschrieben worden. Das Simulationsumfeld berücksichtigt immer noch nur den Fall einer perfekten Vorhersage und dementsprechend ist  $p_{\text{boost,des}}(t + h_i)$  in Abbildung 3-28 a priori bekannt. Eine detaillierte Auswertung der Prädiktionsfehler bezüglich des algorithmischen Verhaltens wird in zukünftigen Projekten erforscht werden; hier wurde es teilweise in Form der Wahrscheinlichkeitskurve berücksichtigt. Der Prädiktionshorizont berücksichtigt zehn Zeitschritte ( $h_i$ ) in einem Intervall von je 1 Sek. Abbildung 3-29 zeigt den Effekt des beschriebenen regelbasierten Algorithmus in einem ausgewählten Ladungsschritt des WLTC. Liest man Abbildung 3-29 von unten nach oben, so sind die Daten wie folgt dargestellt:

1. Gewünschtes Motordrehmoment (links) und Motordrehzahl (rechts).
2.  $\Delta p_{\text{boost,des,wght}}$  (links) und die direkt beeinflussten Quantitäten  $\Delta p_{\text{boost,des,corr}}$  (links) und der  $\text{NO}_x$ -Sollwert (rechts). Die gewünschte, begrenzte  $\text{NO}_x$ -Konzentration ist ebenfalls abgebildet (rechts).
3.  $\Delta p_{\text{boost,des,corr}}$ , der Einlasskrümmerdruck ( $p_{\text{final}}$ ) (links) und die gewünschte Menge an Hoch- und Niederdruck AGR-Massenstrom (rechts).
4. Das Gaswechsellager (links) und die Kompressor-Drehzahl (rechts).
5. Die  $\text{O}_2$ -Konzentration im Zylinder vor (links) und nach (rechts) der Verbrennung.
6. Spontane Ruß- und  $\text{NO}_x$ -Emissionen

Vergleicht man in Abbildung 3-29 die konventionelle (hellgraue Linie) und die Prädiktionsstrategie ohne  $\text{NO}_x$ -Sollwertberichtigung (graue Linie), so sind die Höchstwerte der Ruß- und  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei der Prädiktionsstrategie geglättet. Dies kann durch den Sauerstoffgehalt vor und nach der Verbrennung, die Massenfüllung des Zylinders und die Gesamtmenge an AGR erläutert werden. Der erhöhte verfügbare Sauerstoffgehalt nach der Verbrennung hilft den Ruß abzubrennen. Obwohl der höhere Ladedruck keine direkte Auswirkung auf den  $\text{NO}_x$ -Sollwert aufweist, ermöglicht er eine bessere Zylinderfüllung und niedrigere  $\text{NO}_x$ -Sollwertbegrenzung. Beide Parameter lassen höhere AGR-Raten zu, was drastisch die  $\text{NO}_x$ -Emissionshöchstwerte reduziert.

Wie erwartet sind Kompressor-Drehzahl und Gaswechsellager im Prädiktionsfall erhöht. Dies ist der Hauptgrund für den leichten Anstieg des Kraftstoffverbrauchs, welcher in Abbildung 4-6 registriert und abgebildet ist.

Abbildung 3-29 zeigt ebenfalls einen Vergleich zweier Prädiktionsfälle, in denen ein positiver (dunkelgraue Linie) und ein negativer (schwarze Linie) Wert für  $k_{\text{NO}_x,\text{fac}}$  genutzt werden. Im ersten Fall wird der  $\text{NO}_x$ -Sollwert herabgesetzt, wodurch die AGR-Rate steigt und folglich die  $\text{NO}_x$ -Emissionen sinken. Im zweiten Fall wird der  $\text{NO}_x$ -Sollwert erhöht, wodurch ein Anstieg des Sauerstoffgehalts im Zylinder möglich ist und dabei die Oxidation der Rußpartikel unterstützt.

Der Kompromiss zwischen  $\text{NO}_x$ , Ruß und Kraftstoffverbrauch in Abbildung 3-30 demonstriert das Potenzial des entwickelten Algorithmus. Die Ergebnisse sind in relativen Begriffen in Bezug auf den konventionellen Fall ausgedrückt. Die Reduktion der Emissionshöchststände (Ruß und  $\text{NO}_x$ ) beeinflusst die Emissionsergebnisse des gesamten WLTC wesentlich. Darüber hinaus ermöglichen der vorhandene, erhöhte Ladedruck und die Möglichkeit den  $\text{NO}_x$ -Sollwert entsprechend anzupassen die Wahl eines verbesserten  $\text{NO}_x$ -Ruß-Kompromisses. Dies ist umso wichtiger bei kombinierten Motoren- und Nachbehandlungssteuerungen, bei welchen die Motorsteuerungs-

strategie abhängig von dem Nachbehandlungsstatus und seiner Wirksamkeit angepasst wird.

Der Nachteil des Kraftstoffverbrauchs wird während des kompletten Kompromisses in Abbildung 3-30 konstant bei 0,5 % gehalten. Jedoch erhöht die Reduktion der Rußpartikel den DPF-Regenerationsintervall und folglich den zugehörigen, zusätzlichen Kraftstoffverbrauch. Dieser Effekt ist ebenfalls in Abbildung 3-30 dargestellt anhand der Kraftstoff (Ki) Quantität, bei welcher der Nachteil des Kraftstoffverbrauchs halbiert werden kann.

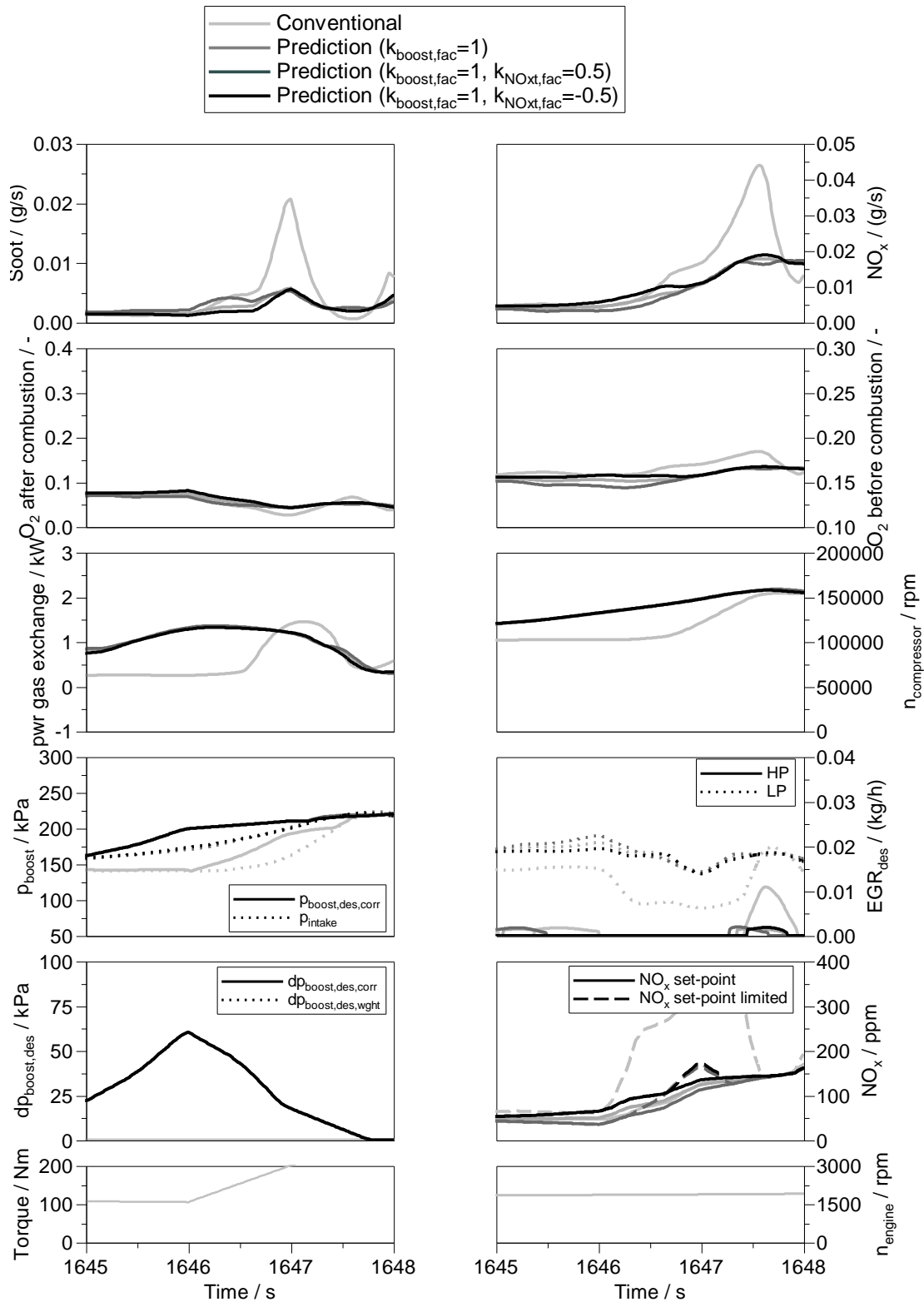


Abbildung 3-29: Vergleich verschiedener Prädiktions- und konventioneller Strategien in einem WLTC Ladeschritt

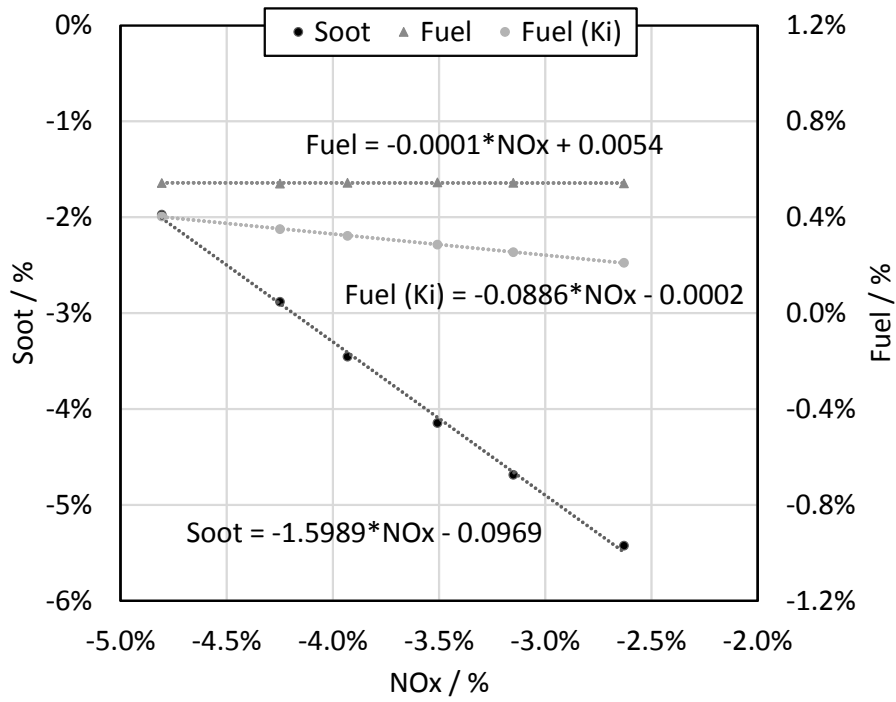


Abbildung 3-30: Kompromiss im WLTC für verschiedene Werte von  $k_{\text{NOx},\text{fac}}$  und  $k_{\text{boost},\text{fac}}=1$ . Ergebnisse sind in relativen Begriffen in Bezug auf den konventionellen Fall ausgedrückt.



### 3.6 Demonstrator

Das für dieses Projekt von der FEV zur Verfügung gestellte Versuchsfahrzeug ist ein Jaguar XE, der mit einem 2,0 L Dieselmotor und Schaltgetriebe ausgestattet ist.



Abbildung 3-31: Versuchsfahrzeug – Jaguar XE 2,0 l Diesel 132 kW

Der in Abschnitt 4.3 beschriebene regelbasierte Algorithmus zur prädiktiven Regelung des Ladedrucks wird auf einer OCT Prototypen Hardware implementiert und ins Fahrzeug integriert. Das OCT ist über eine OBD-CCP-Schnittstelle mit der ECU verbunden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse vorgestellt, die bereits auf dem 25. Aachener Kolloquium in Kombination mit einer Fahrdemonstration veröffentlicht wurden und das Interesse des Fachpublikums geweckt haben.

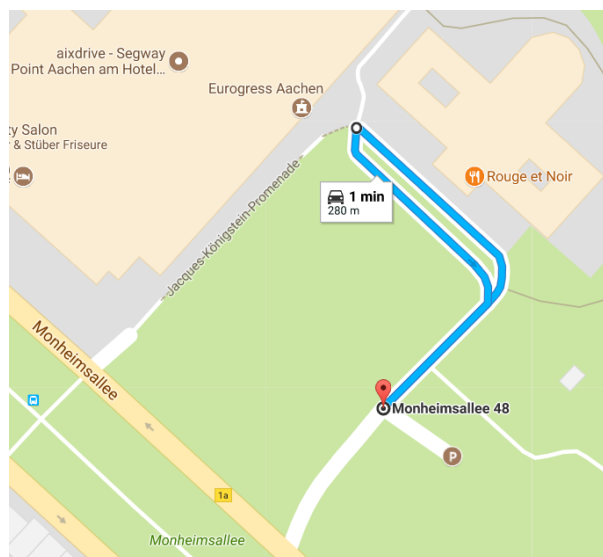
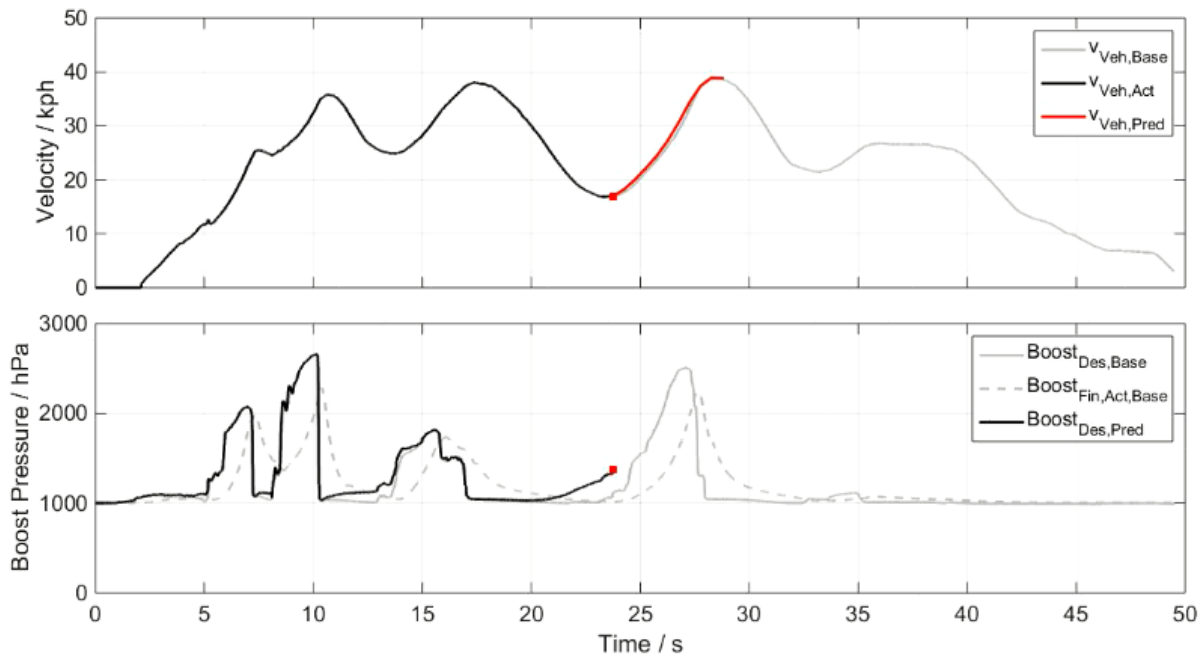


Abbildung 3-32: Teststrecke des 26. Aachener Kolloquiums

Die für die Fahrdemonstration benutzte Teststrecke ist Abbildung 3-32 dargestellt. Die auf dieser Rundfahrt mithilfe des entwickelten Algorithmus erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 3-33 visualisiert. Im oberen Diagramm sind aus einer Messung der zum aktuellen Zeitpunkt ( $t = 24$  s) bereits zurückgelegte  $v_{veh,Act}$  als auch der zukünftig gefahrene Geschwindigkeitsverlauf  $v_{veh,Base}$  dargestellt. Darüber hinaus ist die Geschwindigkeitsprädiktion  $v_{veh,Pred}$  ab dem aktuellen Zeitpunkt für einen Prädiktionshorizont von 5 s in Rot abgebildet. Der Prädiktionsalgorithmus kann den zukünftigen Geschwindigkeitsverlauf auf dieser Rundfahrt bereits mit guter Genauigkeit

vorhersagen. Im unteren Diagramm sind der Ist- und Soll-Ladedruck des Basisfahrzeug ohne prädiktive Algorithmen, sowie der prädiktive, korrigierte Soll-Ladedruck dargestellt. Ein korrigierter, Ist-Ladedruck ist nicht verfügbar, da am OCT die Schreibfunktion aus Sicherheitsgründen noch nicht aktiviert war.



**Abbildung 3-33: Fahrzeuggeschwindigkeitsvorhersage und gewünschter Ladedruck auf der Teststrecke des 26. Aachener Kolloquiums**

Da innerhalb der Projektlaufzeit kein tragbares Emissionsmessgeräts (engl. Portable Emission Measurement System, PEMS) zur Verfügung stand, konnten die Emissionen nicht gemessen werden. Dank der detaillierten Simulationsergebnisse aus Abschnitt 36 ist es jedoch möglich, die Reduktion der Ruß- und  $NO_x$ -Emissionen bei einer frühen Erhöhung des gewünschten Ladedrucks während Beschleunigungsvorgängen auf die Messfahrt zu übertragen.

Anhand dieses Demonstrators konnte die prinzipielle Umsetzbarkeit des Konzepts einer vernetzten Motorsteuerung und das Potenzial prädiktiver Algorithmen gezeigt werden.

## 4 Fazit

Die Projektpartner VEMAC GmbH & Co. KG und die RWTH Aachen University in Form der Juniorprofessur für Mechatronische Systeme am Verbrennungsmotor haben sich zusammen mit dem assoziierten Partner FEV Europe GmbH in diesem Projekt das Ziel gesetzt, die Nutzung von Informationen aus der Fahrzeugkommunikation zur Reduktion der Schadstoffemissionen im realen Fahrbetrieb zu erforschen.

Dazu wurde zunächst mithilfe eines detaillierten Simulationsmodells für ein Fahrzeug mit einem modernen Dieselmotor das Potenzial ermittelt, welches sich ergibt, wenn das Motorsteuergerät nicht mehr nur auf die aktuelle Lastanforderung reagieren muss, sondern auf zusätzliche Informationen über das zukünftige Lastprofil zurück greifen kann. Für verschiedene Vorausschauhorizonte wurden die effizientesten Motorstellgrößen identifiziert. So ergeben sich für einen kurzen Vorausschauhorizont ( $t_{\text{Pred}} < 10\text{s}$ ) die größten Einsparpotenziale, wenn korrigierend in die Regelung des Luftpfads eingegriffen wird. Hierbei können die Rußemissionen bis zu 7% und die NO<sub>x</sub>-Emissionen bis zu 1% reduziert werden. Für mittlere Vorausschauhorizonte ( $10\text{s} < t_{\text{Pred}} < 10\text{min}$ ) kann durch eine vorausschauende Regenerierung des NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysators bei gleichbleibender DeNO<sub>x</sub>-Effizienz der Kraftstoffverbrauch und somit gleichzeitig die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 1,1% reduziert werden. Wenn noch für deutlich größere Horizonte ( $t_{\text{Pred}} > 10\text{min}$ ) Informationen zur Verfügung stehen, kann durch eine prädiktive Reinigung des Dieselpartikelfilters der Gesamtkraftstoffverbrauch im realen Fahrbetrieb um bis zu 5,5 % reduziert werden.

Die dazu erforderliche, neuartige Hardware, die die Fahrzeugkommunikation, die Schnittstelle zum Motorsteuergerät und auch die Rechenkapazität für die prädiktiven Motorregelalgorithmen bereitstellt, wurde in diesem Projekt von der VEMAC entwickelt. Da dieses Werkzeug, bezeichnet als OCT (Online Calibration Tool), theoretisch auch so weiterentwickelt werden könnte, dass es auch bei älteren Fahrzeugen nachgerüstet werden kann, ist in diesem Projekt ein bedeutender Hebel zur Reduktion von klima- und gesundheitsschädlichen Emissionen entstanden.

Um die in diesem Projekt aufgezeigten Potenziale, nur durch zusätzliche Informationen deutliche Schadstoffreduktionen zu erreichen, vollständig nutzen zu können, sollten auch zukünftig sowohl Hardware als auch Software erweitert werden. So sollte die zuvor entwickelte Hardware um zusätzliche Schnittstellen für weitere Sensorik erweitert werden, sodass mittels Radar bzw. Lidar und Kamera auch Fahrzeuge detektiert werden können, die nicht mit Fahrzeugkommunikation ausgestattet sind. Darüber hinaus sollte die Software dahingehend erweitert, dass auch zusätzliche Verkehrsinformationsquellen genutzt werden können. Die bisher verwendeten prädiktiven Motorregelalgorithmen, sind regelbasiert. Zukünftig ist es erstrebenswert, diese mit echtzeitfähigen mathematischen Optimierungsverfahren zu erweitern. Die für die prädiktiven Motorregelalgorithmen erforderliche Prädiktion des zukünftigen Lastprofils sollte für verschiedenste Situationen und Prädiktionshorizonten validiert werden.

## 5 Literaturverzeichnis

- [AV11] ASADI, Behrang ; VAHIDI, Ardalan: *Predictive Cruise Control : Utilizing Upcoming Traffic Signal Information for Improving Fuel Economy and Reducing Trip Time*. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 19 (2011), Nr. 3, S. 707–714
- [BTD06] BISWAS, S. ; TATCHIKOU, R. ; DION, F.: *Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety*. In: *IEEE Communications Magazine* 44 (2006), Nr. 1, S. 74–82
- [BVA16] BLANCO-RODRIGUEZ, David ; VAGNONI, Giovanni ; AKTAS, Sahin ; SCHAUB, Joschka: *Model-based Tool for the Efficient Calibration of Modern Diesel Powertrains, Ausgabe 10/2016*. In: *MTZ worldwide*. 10/2016, 2016, S. 64–69
- [DMR14] DI TARANTO, Rocco ; MUPPIRISETTY, Srikar ; RAULEFS, Ronald ; SLOCK, Dirk ; SVENSSON, Tommy ; WYMEERSCH, Henk: *Location-Aware Communications for 5G Networks : How location information can improve scalability, latency, and robustness of 5G*. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 31 (2014), Nr. 6, S. 102–112
- [Gip81] GIPPS, P. G.: *A behavioural car-following model for computer simulation*. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 15 (1981), Nr. 2, S. 105–111
- [GDB15] GRAF, Friedrich ; DEINHARD, Siegmund ; BOTTKE, Christian ; GRUBWINKLER, Stefan: *Connected Energy Management with a Backend-based Driving Strategy as an Example*. In: *MTZ worldwide* 76 (2015), Nr. 12, S. 10–15
- [Hel97] HELBING, Dirk: *Verkehrsdynamik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1997
- [IWM15] ITO, Hayami ; WAKO, Kenta ; MURASE, Tutomu ; SASAJIMA, Kazuyuki: *Crash warning for intersection and head-on car collision in vehicle-to-vehicle communication*. In: *2015 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE) : IEEE, 2015, S. 240–247*
- [JMJ15] JOHANNESSON, Lars ; MURGOVSKI, Nikolce ; JONASSON, Erik ; HELLGREN, Jonas ; EGARDT, Bo: *Predictive energy management of hybrid long-haul trucks*. In: *Control Engineering Practice* 41 (2015), S. 83–97
- [KPK16] KNOBEL, Christian ; PÖLTENSTEIN, Axel ; KNOLLER, Stefan: *Predictive Efficient Dynamics Features*. In: *ATZ worldwide* 118 (2016), Nr. 4, S.16–21
- [KSM14] KÖRFER, Thomas ; SCHNORBUS, Thorsten ; MICCIO, Michele ; SCHAUB, Joschka: *Emissionsbasierte AGR-Strategien für RDE beim Dieselmotor*. In: *MTZ worldwide*. 9/2014, 2014
- [KJP14] KURAL, Emre ; JONES, Stephen ; PARRILLA, Alejandro Ferreira ; GRAUERS, Anders: *Traffic light assistant system for optimized energy consumption in an electric vehicle*. In: *2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE) : IEEE, 2014, S. 604–611*

- [LQS17] LEE, Sung-Yong ; QUÉREL, Carol ; SCHAUB, Joschka ; KÖTTER, Matthias; POLITSCH, Davy ; HADJ-AMOR, Hassen: X-in-the-Loop-basierte Kalibrierung: HiL-Simulation eines virtuellen Dieselantriebsstrangs. In: *19. MTZ-Fachtagung - Simulation und Test*, 2017
- [MFF10] MORAN, Kevin ; FOLEY, Brendan ; FASTENRATH, Ulrich ; RAIMO, Jeff: *Digital Maps, Connectivity and Electric Vehicles - Enhancing the EV/PHEV Ownership Experience*. In: *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems* 3 (2010), Nr. 2, S. 76–83
- [NA17] NOLL, Andreas ; AMENT, Christoph: Potenzialanalyse prädiktiver Streckendaten zur Komfortsteigerung von Fahrzeugen mit geregelten Vertikaldynamiksystemen. In: *AUTOREG 2017 : Automatisiertes Fahren und vernetzte Mobilität, 8. VDI/VDE-Fachtagung, Berlin, 05. und 06. Juli 2017*. Düsseldorf : VDI-Verl., 2017 (VDI-Berichte, 2292).
- [RHP15] RICHENHAGEN, Johannes Martin; HARIHARAN, Venkitachalam; PISCHINGER, Stefan ; SCHLOSER, Axel: PERSIST – A scalable software architecture for the control of diverse automotive hybrid topologies. In: *15. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik*, 2015, S. 37–56
- [RSB14] RICHENHAGEN, Johannes Martin ; SCHNORBUS, Thorsten Gregor ; BIRMES, Georg ; PIETA, Holger: *PERSIST : A Modular and Scalable SW Architecture for Innovative Control Functionalities*. In: *Fahrzeug- und Motorentechnik* (2014), S. 1309–1328
- [SSM15] SCHNORBUS, Thorsten ; SCHAUB, Joschka ; MICCIO, Michele ; GLADOS, Felix ; MORRA, Edoardo ; Rasty Mohammad ; OGRZEWALLA, Jürgen ; POTTEAU, S.: Mild Hybridisation and Electric Boosting Improving Diesel Emissions and Fuel Efficiency with Premium Performance. In: *24. Aachener Kolloquium*. Aachen, 2015
- [SLM17] SHEN, Daliang ; LU, Liting ; MÜLLER, Steffen: *Utilization of predictive information to optimize driving and powertrain control of series hybrid vehicles*. In: *Automotive and Engine Technology* 2 (2017), 1-4, S. 39–47
- [Ter10] TERWEN, Stephan: *Vorausschauende Längsregelung schwerer Lastkraftwagen*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2009. Print on demand. Karlsruhe, Hannover : KIT Scientific Publ; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2010 (Schriften des Instituts für Regelungs- und Steuerungssysteme, Karlsruher Institut für Technologie 6)
- [The15] THEMANN, Philipp: *Automatisierte Fahrzeuglängsführung zur Optimierung der Energieeffizienz unter Nutzung kooperativer Informationen*. Dissertation. 2015
- [THH00] TREIBER, Martin ; HENNECKE, Ansgar ; HELBING, Dirk: *Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations*. In: *Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics* 62 (2000), 2 Pt A, S. 1805–1824
- [TK10] TREIBER, Martin ; KESTING, Arne: *Verkehrsdynamik und -simulation*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2010

- [Wie73] WIEDEMANN, Rainer: *Simulation des Strassenverkehrsflusses*. Karlsruhe, Universität Fridericiana Karlsruhe, Institut für verkehrswesen. Habilitationsschrift. 1973