

STEP

Smart Traffic Eco Powertrains

Entwicklung einer prädiktiven Regelung mit Einbindung externer Signale und Sensordaten zur Effizienzsteigerung und Emissionsminderung bei Elektro- und Verbrennungsmotoren

Abschlussbericht

Über ein Forschungsprojekt,
gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
unter dem Az: 34299/01



von:

Michael Kiausch, Lars Posdena

VEMAC

Paul Muythalya, Christian Sohn,
Markus Eisenbarth, Prof. Dr.-Ing. Jakob Andert



Aachen,
März 2021

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	34299/01	Referat	21	Fördersumme	320.000,00 EUR
----	-----------------	---------	-----------	-------------	-----------------------

Antragstitel	STEP – Entwicklung einer prädiktiven Regelung mit Einbindung externer Signale und Sensordaten zur Effizienzsteigerung und Emissionsminderung bei Elektro- und Verbrennungsmotoren
---------------------	--

Stichworte	Nachhaltige Mobilität – Emissionsreduktion – Kraftstoffeinsparung – Prädiktive Regelung – Vernetzte Fahrzeuge – RDE
-------------------	---

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
30 Monate	01.07.2018	31.12.2020	1
Zwischenberichte	16.08.2019	30.03.2020	

Bewilligungsempfänger	VEMAC Gmbh & Co. KG Krantzstr. 7 52070 Aachen contact@vemac.de www.vemac.de	Tel	0241/1829290
		Fax	0241/1829299
		Projektleitung Lars Posdena	
		Bearbeiter	

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

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die realen Emissionswerte von Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor weichen oft sehr stark von den während der Homologation gemessenen Werten ab. Ein Hauptgrund dafür sind die deutlich höheren Dynamikanteile im realen Fahrzeugeinsatz im Gegensatz zu denen in den derzeit verbindlichen Fahrzyklen. Schnelle Lastwechsel führen zu instationären Zuständen im Brennverfahren, die das Motorsteuergerät fortwährend durch Regeleingriffe kompensieren muss. Trotz aufwändiger Abgasnachbehandlungssysteme stellt die fehlende Kenntnis des Fahrprofils eine große Herausforderung dar. Entscheidend für die Antriebseffizienz von Fahrzeugen mit Elektro- und Hybridantrieb sind eine intelligente Steuerung des Batterieladestands (SOC, State-Of-Charge) und eine geeignete Rekuperationsstrategie. Auch hierbei sind eine möglichst genaue Kenntnis des Fahrprofils und eine vorausschauende Regelung entscheidend.

Bei dem von der DBU geförderten Vorgängerprojekt „NET-ECU – vernetzte Motorsteuerung“ konnte gezeigt werden, dass die Regelung von Verbrennungsmotorsteuerungen durch Hinzunahme von Umgebungsdaten wie z.B. den Bewegungsprofilen anderer Fahrzeuge und Infrastrukturdaten in Hinsicht auf Kraftstoffverbrauch und Emissionswerte signifikant verbessert werden kann.

Im Projekt „STEP – Smart Traffic Eco Powertrain“ haben sich die VEMAC, die RWTH und die FEV als assoziierter Partner das Ziel gesetzt, die vielversprechenden Ansätze des Vorgängerprojekts zu erweitern und in realen Verkehrssituationen zu erproben. Während beim NET-ECU Projekt ausschließlich Umgebungsdaten aus Fahrzeug-zu-Fahrzeug und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation (V2V und V2X) verwendet wurden, wird im Projekt STEP der Fokus unter anderem auf die Verwendung eigener Sensorik wie z.B. Radar, Lidar und Kamera sowie die Verwendung von Routen- und Verkehrsinformationen über Onlinedienste gelegt. Neben der Optimierung der Verbrennungsmotorsteuerung werden Möglichkeiten zur Verbesserung der Längsführung und Ladestrategie bei Hybridfahrzeugen auf Basis derselben Daten analysiert.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Rahmen des Projekts wurde zunächst das Entwicklungswerkzeug OCT um Schnittstellen zur Nutzung der oben genannten Sensordaten und Onlinedaten erweitert.

Für die Entwicklung der Regelungsalgorithmen wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, welche die Entwicklung der Algorithmen auf verschiedenen Fahrzeugtopologien ermöglicht. Mithilfe dieser Simulationsumgebung wurden verschiedene Konzepte prädiktiver Fahrzeugsteuerungsalgorithmen entwickelt und evaluiert. Hierzu wurden verschiedene Studien durchgeführt:

1. Für Mild-Hybrid Fahrzeuge wurde die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch pulsierendes & gleitendes Fahren analysiert.
2. Für batterieelektrische Fahrzeuge wurde der Antriebsenergiebedarf durch vorausschauende Geschwindigkeitswahl minimiert
3. Für Diesel Plug-In Hybrid-Fahrzeuge wurde eine Studie zur Optimierung des Energiemanagement durch Einbezug vorausschauender Verkehrsinformationen durchgeführt.

Zur Validierung der Ergebnisse wurde ein Versuchsfahrzeug mit der Entwicklungsplattform ausgerüstet um die zuvor entwickelten Algorithmen auf abgeschlossenem Testgelände sowie im realen Straßenverkehr testen zu können

Ergebnisse und Diskussion

Das Online Calibration Tool wurde für die Nutzung weiterer Sensordaten via CAN sowie die Nutzbarkeit von Onlinedaten verschiedener Datenanbieter vorbereitet. Darüber hinaus konnte die Bedienbarkeit der Benutzeroberfläche deutlich verbessert werden, so dass in Zukunft eine flexible und kosteneffiziente Plattform für die Entwicklung intelligenter prädiktiver Regelungsalgorithmen im realen Fahrzeug zur Verfügung steht.

Das im Rahmen des Projekts entwickelte Simulationsmodell kann flexibel für die Entwicklung neuartiger Regelstrategien eingesetzt werden. Dabei können verschiedene Fahrzeugtopologien berücksichtigt und unterschiedliche Fahrscenarien wie der WLTP oder selbstgewählte Streckenführungen gewählt werden. Im Rahmen der auf dieser Umgebung durchgeführten Simulationsstudien konnten unter bestimmten Randbedingungen die folgenden Einsparpotentiale identifiziert werden:

1. Mild-Hybrid Fahrzeuge: Bis zu max. 14% Kraftstoffersparnis je nach Kalibrierung und Verkehrsdichte (Simulation)
2. Batterieelektrische Fahrzeuge: Im Mittel 15% Antriebsenergie bei Kreuzungsan- und Überfahrten (Simulation)
3. Diesel Plug-In Hybrid-Fahrzeuge: 1,4% Kraftstoffersparnis (Simulation) und 19% Reduktion der NOx-Emissionen (Demonstrator)

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- „Predictive Trip-assisted Energy and Thermal Management for Plug-in Hybrid Electric Vehicles“, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems - geplant
- Dissertationen der Herren Muthyala, Sohn und Eisenbarth - geplant

Fazit

Anhand der Simulationsstudien konnten signifikante Einsparpotentiale durch den Einsatz intelligenter vernetzter Regelstrategien identifiziert und am Versuchsfahrzeug im realen Straßenverkehr bestätigt werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Regelstrategie von Fahrzeugsteuergeräten durch die Hinzunahme von Umgebungsinformationen hinsichtlich Energieverbrauch und Emissionswerten positiv beeinflusst werden kann. Die hierzu benötigten Sensorinformationen in Form von Kamera-, Radar- und Onlinedaten sowie Fahrzeug-zu-Fahrzeug und Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikationsdaten stehen in heutigen Fahrzeugen häufig schon zur Verfügung, da diese für die zunehmende Anzahl an Fahrerassistenz- und Sicherheitssystemen benötigt werden. Mit dem Online Calibration Tool steht in Zukunft eine kosteneffiziente Entwicklungsplattform für die Entwicklung neuartiger vernetzter Regelstrategien zur Verfügung.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	9
2	Einleitung.....	10
3	Hauptteil	13
3.1	Systemerweiterung des Online Calibration Tools	13
3.1.1	Integration neuer Datenquellen	14
3.1.2	Datenlogger.....	21
3.2	Konzeptionierung prädiktiver Fahrzeugsteuerungsalgorithmen.....	22
3.2.1	Simulationsstudie für ein Mild-Hybrid Fahrzeug: Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch pulsierendes & gleitendes Fahren	22
3.2.2	Simulationsstudie für ein batterieelektrisches Fahrzeug: Reduktion des Energiebedarfs durch vorausschauende Geschwindigkeitswahl	34
3.2.3	Simulationsstudie für ein Plug-In Hybrid-Fahrzeug: Optimiertes Energiemanagement durch Einbezug vorausschauender Verkehrsinformationen	40
3.3	Demonstration an einem Plug-In Versuchsfahrzeug	51
4	Fazit	58
5	Literaturverzeichnis	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1 Unterschied im CO ₂ - Ausstoß im realen Verkehr gegenüber Herstellerangaben.....	10
Abbildung 4-1 VEMAC OCT Hardware	13
Abbildung 4-2 Detailansicht einer auf dem OCT installierten Applikation	14
Abbildung 4-3 Device Manager der OCT Weboberfläche	15
Abbildung 4-4 Darstellung einer dbc Datei im Kvaser Database Editor	15
Abbildung 4-5 Darstellung von Kameradaten vom CAN Bus auf der OCT Weboberfläche.....	16
Abbildung 4-6 OBD-2 Buchse, Quelle: Von Losch - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38352330	17
Abbildung 4-7 OBD-2 USB-Adapter.	17
Abbildung 4-8 Bezug von Daten eines Geodaten-Anbieters.....	18
Abbildung 4-9 Konfigurationsoberfläche des Access Points des OCTs.....	19
Abbildung 4-10 Kommunikation zwischen Simulink-Modell und HERE Maps Script über den DataStore	20
Abbildung 4-11 PdCom Schnittstelle zur Simulink-App im OCT-Gesamtkontext.....	21
Abbildung 4-12 Trigger Ansicht in der Weboberfläche des Datenloggers	21
Abbildung 4-13: Funktionsarchitektur der Fahrzeuglängsführung.	23
Abbildung 4-14: Anhand der Schaltzeiten der LSA und dem prädizierten Verlauf des VFs werden die Positionsgrenzen gebildet, die das Egofahrzeug nicht überschreiten bzw. unterschreiten darf. Die LSA ist zwischen Sekunde 5 und 15 grün.....	25
Abbildung 4-15: Rundkurs innerhalb der Stadt Paderborn. Die LSA sind als Kreise eingezeichnet mit einer Momentaufnahme der Schaltzeiten. Die als Querbalken gekennzeichneten 42 Querstraßen besitzen keine LSA. Der Nullpunkt des Rundkurses wird kurz vor der ersten LSA definiert, gekennzeichnet durch den Pfeil. Die erste LSA erscheint nach 56,9 m. Nummerierung der LSA und Fahrtrichtung des Egofahrzeugs sind entgegen dem Uhrzeigersinn.	26
Abbildung 4-16: MHEV: Kraftstoffverbrauch pro Strecke und absolute Fahrzeit (links) und relativer Verbrauch und relative Fahrzeit (rechts) bei Variation von α_{stat} in Schritten von 0, 1. Die Route wird ohne LSA und ohne Verkehr durchfahren.	30
Abbildung 4-17: MHEV: Relativer Verbrauch und relative Fahrzeit bei Variation der Langzeitplanung (LZP an/aus), der Mindestgeschwindigkeit zum Anfahren der LSA, der LSA-Anfahrtsplanung (LSAP an/aus) und des Fahrkomfortlevels.....	31
Abbildung 4-18: MHEV: Relativer Verbrauch als Funktion der Mindestgeschwindigkeit bei aktivierter LZP und LSAP.	32
Abbildung 4-19: MHEV: Absoluter Verbrauch über Fahrzeit von der Referenzmessung ohne KZP und LZP (G) für $\rho_{glob} / (VT/km) \in 4, 3; 12, 8; 25, 6; 38, 4; 51, 2; 68, 2$ (von links nach rechts).	32
Abbildung 4-20: MHEV: Verbrauchserhöhung (oben) und der Fahrzeiterhöhung (unten) bei Variation der Verkehrsdichte (Mittelwerte und Standardabweichung).	34
Abbildung 4-21: Übersicht des Gesamtkonzepts der entwickelten Funktionen	35
Abbildung 4-22: Schematische Darstellung eines Geschwindigkeit-Zeit-Lösungsraums (grauer Bereich: nicht zulässig, blauer Punkt: aktuelle Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs, blaue Linie: optimaler Geschwindigkeitsverlauf zum aktuellen Zeitpunkt t_0) für eine beispielhafte Route mit ortsfesten Geschwindigkeitsgrenzen	37
Abbildung 4-23: Schematische Darstellung eines Weg-Zeit-Lösungsraums für eine Beispielkreuzungssituation, Abbildung wurde teilweise mithilfe von icograms erstellt (https://icograms.com erstellt).....	38
Abbildung 4-24: Energiebedarf der optimierten Fahrstrategie im Vergleich zu 30 Referenzfahrzeugen (neg.: Energieeinsparung, pos.: Energiemehrbedarf)	40
Abbildung 4-25: Antriebsstrang-Layout und technische Spezifikationen des Hybrid-Demonstratorfahrzeugs	42
Abbildung 4-26: Schematische Darstellung des in den Simulationen berücksichtigten Antriebsstrangmodells	43
Abbildung 4-27: Steady-State-Wirkungsgradkennfeld des Dieselmotors (links) und Innenwiderstandsmodell der Batterie (rechts)	44
Abbildung 4-28: Simulationsergebnisse für die Geschwindigkeitsnachführung im WLTC-Zyklus	46
Abbildung 4-29: Schematische Darstellung des kaskadierten Geschwindigkeitsreglers	48
Abbildung 4-30: Auto folgendes Szenario	48
Abbildung 4-31: Simulationsergebnisse des kaskadierten Geschwindigkeitsreglers	50
Abbildung 4-32: Integration der OCT-Box in das Demonstratorfahrzeug	51
Abbildung 4-33: Reise- und Verkehrsinformationen, die das OCT von HERE Maps erhält	53
Abbildung 4-34: Ausgewählte Strecke in Aachen zwischen VKA und VEMAC zur Demonstration der vorausschauenden Wärmemanagement-Strategie	54
Abbildung 4-35: NO _x -Emissionen einer nicht prädiktiven Motorstartstrategie bei einer Umgebungstemperatur von 6,5°C und NH ₃ -Belastung am SCR 0,145 g/l	55

Abbildung 4-36: NO_x-Emissionen einer prädiktiven Motorstartstrategie bei einer Umgebungstemperatur von 9,5°C und NH₃-Belastung des SCR 0,141 g/l 56

Abkürzungsverzeichnis

4G	Mobile Internetverbindung der 4. Generation
ACC	Adaptive Cruise Control
API	Programmierschnittstelle
CAN	Controller Area Network
CAN-DB	CAN-Bus Beschreibungsdatei
CCP	CAN Calibration Protocol
CSV	Comma Separated Values
DBC	CAN-Bus Beschreibungsdatei
EATS	Exhaust After Treatment System
ECU	Engine Control Unit
EM	Elektrische Maschine
EMS	Energy Management Strategy/System
GPS	Global Positioning System
HCU	Hybrid Control Unit
HEV	Hybrid Electrical Vehicle
IDM	Intelligent Driver Model
IMU	Inertial Measurement Unit
ITS-G5	European intelligent transport system C2X standard
JSON	JavaScript Object Notation
KFZ	Kraftfahrzeug
KZP	Kurzzeitplanung
LSA	Lichtsignalanlage
LZP	Langzeitplanung
MDF	Measurement Data Format
MPR	Modellprädiktive Regelung
NMPR	Nichtlineare Modellprädiktive Regelung
OBD	On-Board Diagnosis
OCP	Optimal Control Problem
OCT	Online Calibration Tool
OCV	Open Circuit Voltage
PdCom	Process Data Communication Protocol
PnG	Pulse and Glide
RDE	Real Driving Emissions
REST	Representational State Transfer
SCR	Selective Catalytic Reduction
SOC	State of Charge
SPI	Serial Peripheral Interface
SUMO	Simulation of Urban Mobility
TCP	Transmission Control Protocol
USB	Universal Serial Bus
V2C	Vehicle to Cloud
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
V2X	Vehicle to X
VF	Vorderfahrzeug
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VT	Verkehrsteilnehmer
WLAN	Wireless Local Area Network
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle
XCP	Universal Calibration Protocol

1 Zusammenfassung

Die vorausschauende Antriebsstrangregelung birgt ein hohes Potenzial die CO₂- und Schadstoffemissionen im Mobilitätsbereich zu reduzieren. Dies setzt voraus, dass Informationen aus der Fahrzeugumgebung (u.a. von Lichtsignalanlagen, Verkehrsschildern, Verkehrsteilnehmern) wahrgenommen und den Fahrzeugsteuergereäten zur Verfügung gestellt werden können. Daher wurde bereits im Vorgängerprojekt NET-ECU das sogenannte Online Calibration Tool entwickelt, ein eingebettetes System, das sowohl Schnittstellen für den Datenaustausch bereitstellt als auch Eingriffe in die Fahrzeugsteuerung ermöglicht.

Aufbauend auf dem Vorgängerprojekt wurden der Fokus im aktuellen Projekt STEP darauf gelegt, die Integration weiterer Sensorik zu ermöglichen und zum anderen die Nutzbarkeit von Funktionen, die über den Einsatz als Kalibriersystem hinausgehen, zu verbessern. So wurde eine Cloud-Anbindung realisiert, um detailreiche Karten- und Verkehrsdaten während des Fahrzeugbetriebs zur Verfügung zu stellen. Weiterhin wurde eine Kommunikationsschnittstelle über CAN implementiert, um Daten einer Frontkamera zu empfangen. Darüber hinaus wurde ein Datenlogger integriert und die Benutzerfreundlichkeit erhöht.

Die Weiterentwicklung des OCT wurde begleitet durch Simulationsstudien, die das Potenzial durch die Nutzung eines OCT in Kombination mit vorausschauenden Algorithmen der Fahrzeugsteuerung für drei verschiedene Antriebsstrangtopologien (Otto Mild-Hybrid, Diesel Plug-In-Hybrid und reiner Elektroantrieb) untersucht. Für den Mild-Hybrid wurde eine vorausschauende Strategie „Pulse & Glide“ umgesetzt. So konnte gezeigt werden, dass je nach Kalibrierung und Verkehrsaufkommen bis zu 14% Kraftstoff und somit auch klimaschädliches CO₂ eingespart werden kann. Für den Plug-In Hybrid wurde ein prädiktives Energiemanagement implementiert. Die durchgeführte Simulationsstudie zeigt ein Kraftstoffeinsparpotenzial von bis zu 1.4%. Mithilfe der Implementierung einer automatisierten, vorausschauenden Geschwindigkeitsregelung konnte durch Vermeidung von unnötigen Verzögerungs- und Beschleunigungsmanövern der Antriebsenergiebedarf für ein Mittelklasse Elektrofahrzeug bei Kreuzungsan- und Überfahrt im Durchschnitt um bis zu 15% verringert werden.

Letztlich wurden die Funktionsfähigkeit und der Nutzen des OCT an einem von der FEV zur Verfügung gestellten, realen Versuchsträger demonstriert. Dazu wurde ein OCT in das bereits in der Simulationsstudie virtuell betrachtete Diesel Plug-In Hybridfahrzeug integriert und im realen Straßenverkehr zum Einsatz gebracht. Hier konnte eine Minderung der NO_x-Emissionen um 19% nachgewiesen werden.

Das OCT wird nach Projektende nun für den Markteintritt vorbereitet. Aus wissenschaftlicher Sicht steht die Validierung der entwickelten Funktionen der noch verbleibenden Antriebsarten in realen Versuchsfahrzeugen an.

Ein großes Dankeschön gilt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, die dieses Vorhaben durch ihre Förderung unter dem Aktenzeichen (Az: 34299/01) ermöglicht hat.

2 Einleitung

Mobile Antriebe hängen noch immer stark von fossilen Energieträgern ab und verursachen insbesondere in Ballungsräumen einen signifikanten Anteil der Emissionen. Aktuell steht der immer größer werdende Unterschied zwischen den unter realen Verkehrsbedingungen gemessenen Kraftstoffverbräuchen und Schadstoffemissionen zu den in Fahrzyklen ermittelten Werten im Fokus. Hauptgrund für diese Unterschiede ist laut [1] die weitaus höhere Dynamik im realen Fahrbetrieb gegenüber den vordefinierten Fahrzyklen. So konnte auch in [2] die immer weiter aufklaffende Schere zwischen Kundenverbrauch und den Herstellerangaben beobachtet werden (vgl. Abbildung 2-1). Während im Jahr 2002 die real gemessenen Kraftstoffverbräuche je nach Quelle zwischen 1% und 9% über den Zertifizierungswerten lagen, so wurde zum letzten Vergleichszeitpunkt im Jahr 2010 bereits ein Unterschied von bis zu 21% dargestellt.

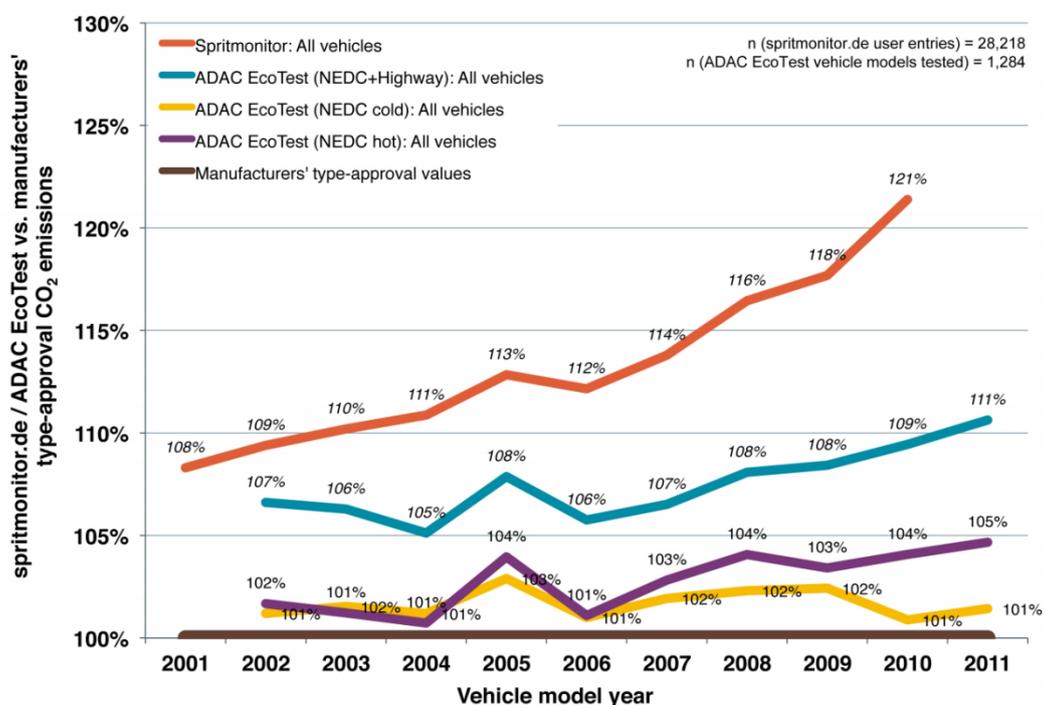


Abbildung 2-1 Unterschied im CO₂- Ausstoß im realen Verkehr gegenüber Herstellerangaben

Neben dem Kraftstoffverbrauch ergeben sich auch bei den Schadstoffemissionen Abweichungen im realen Fahrbetrieb. Vor allem der individuelle Fahrstil des Fahrzeugführers hat hierbei die größten Auswirkungen [1]. Eine instantane Lasterhöhung bewirkt Abweichungen von bis zu 100% im Vergleich zum Stationärwert [3]. Da ein Großteil der realen Emissionen im transienten Bereich entsteht, ist ein großes Optimierungspotenzial durch Vermeidung bzw. Vorhersage solcher transienter Phasen zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs und der Rohemissionen gegeben.

Derzeit verwendete Motorsteuerungen bestimmen die Motorbetriebspunkte anhand zahlreicher Sensoren, welche den aktuellen Umgebungszustand präzise erfassen.

Dabei lassen sich stationär optimale Betriebspunkte mit guter Effizienz finden, allerdings können keine Voraussagen über das weitere Fahrverhalten oder die zukünftige Umgebung getroffen werden.

Heutige Fahrzeuge verfügen jedoch zunehmend über weitere Sensoren und Kommunikationsmöglichkeiten wie die V2X-Kommunikation, wodurch sich der Ereignishorizont deutlich erweitern ließe. Hier besteht also ein großes Verbesserungspotenzial hinsichtlich Real Driving Emissions (RDE).

Durch prädiktive Fahrstrategien, die nicht nur die Rohemissionen des Verbrennungsmotors, sondern allgemein den Energiebedarf reduzieren, kann auch bei Elektro- und Hybridfahrzeugen ein großer Schritt hinsichtlich der CO₂-Einsparung gemacht werden. Obgleich in Zukunft der Anteil der erneuerbaren Energien an der Strombereitstellung steigt, wird auch für elektrifizierte Antriebe weiterhin ein energieeffizienter Betrieb erforderlich sein. Durch einen geringen Energiebedarf können Batterien kleiner dimensioniert werden und so die knappen Ressourcen, die für die Batterieherstellung benötigt werden, geschont werden.

Anhand von Simulationen und durch Verifikation am Fahrzeug konnte im Rahmen des von der DBU geförderten Projekts „Vernetzte Motorsteuerung“ gezeigt werden, dass verschiedene Teilsysteme konventioneller Motorsteuerungen, wie z.B. Ladedruckregelung oder Partikelfilter durch Hinzufügen von Umfeldinformationen in effizienteren Arbeitspunkten betrieben werden können, wodurch signifikante Emissionsreduktionen erzielt werden können. Dabei wurde auch gezeigt, dass durch längere Prädiktionshorizonte und detailliertere Ausarbeitung des Umgebungsmodells weitere Möglichkeiten sowohl zur Emissionsoptimierung als auch zur generellen Energieoptimierung durch Einfluss auf die Fahrzeuglängsdynamik offenstehen.

Ziel dieses Projektes ist die Weiterentwicklung des im Rahmen des Projektes „Vernetzte Motorsteuerung“ entworfenen Forschungswerkzeuges sowie die Umsetzung und Weiterentwicklung der im Vorgängerprojekt aufgezeigten Potentiale.

Hierbei soll zum einen die Emissionsreduktion durch prädiktive Motorregelung weiterverfolgt, und zum anderen Verbrauchsreduktion durch optimierte Fahrzeuglängsführung simuliert und am Versuchsfahrzeug dargestellt werden.

Im Vorgängerprojekt wurde ein regelbasierter Algorithmus zur Reduktion von Emissionen, die durch einen Verzug im Druckaufbau im Turbolader in transienten Fahrsituationen verursacht werden, entwickelt und vorgestellt. Im Rahmen des STEP Projekts wird dieser regelbasierte Ansatz durch eine mathematische Optimierung ersetzt. Das Ziel der Optimierung ist es, einmal aufgewendete kinetische Energie möglichst lange zu erhalten und nicht durch Bremsen in Wärme zu wandeln. Die Algorithmen werden sowohl für konventionelle Fahrzeuge als auch für Fahrzeuge mit hybridem oder rein elektrischem Antriebsstrang entwickelt.

Für die Validation der in diesem Arbeitspaket entwickelten Algorithmen wird eine Simulationsumgebung aufgebaut, die die zu untersuchenden Fahrzeug-Topologien (konventioneller, hybrider und rein elektrischer Antriebsstrang) inklusive der Kommunikationsschnittstelle in einem möglichst realen Verkehrsumfeld darstellt.

Da bislang nur wenige Fahrzeuge serienmäßig mit V2X-Hardware ausgestattet werden, kann das im vorherigen Projekt aufgezeigte Potential vorläufig nur bedingt ausgeschöpft werden. Zudem konnte anhand von Simulationen gezeigt werden, dass

durch einen längeren Prädiktionshorizont im Allgemeinen größere Verbesserungen zu erzielen sind. Prinzipbedingt kann mit Hilfe der V2X-Kommunikation nur ein kurzer bis bestenfalls mittlerer Prädiktionshorizont generiert werden. Durch Datenfusion der V2X Daten mit weiteren Sensoren wie z.B. Radar, Lidar und Kamera sowie durch die Hinzunahme von externen Datenquellen wie z.B. Karten- und Verkehrsflussdaten über mobile Internetverbindungen kann hier weiteres Potential genutzt werden.

Für die Validierung im Fahrzeug wird zunächst das als Entwicklungswerkzeug eingesetzte Online Calibration Tool (OCT) erweitert, um die oben genannten Daten erfassen und verwenden zu können. Die Sensoren werden dabei über vorhandene Schnittstellen des OCT (CAN, USB, Ethernet) angebunden. Die OCT Software wird um die von den Sensoren verwendeten Protokolle erweitert so dass die Daten im Datenpool der OCT Software zur Verfügung gestellt werden können.

Zur Verwendung von Geodaten und Echtzeit-Verkehrsdaten wird das OCT über eine 4G Mobilfunkverbindung mit einem Internetzugang versehen. Die Geodaten können von verschiedenen Anbietern über definierte Schnittstellen abgerufen werden. Da diese Schnittstellen nicht anbieterübergreifend einheitlich sind, wird das OCT System so erweitert, dass die Daten über ein an den jeweiligen Anbieter angepasstes Script abgerufen und über den OCT-Datenpool für die weitere Verwendung mit den sonstigen Sensordaten kombiniert und vom Regelungsmodell verwendet werden kann.

Zur Validierung der entwickelten Algorithmen im realen Fahrzeug wird das Entwicklungswerkzeug in ein Testfahrzeug integriert. Hierzu sind entsprechende Schnittstellen zu den Antriebssteuergeräten zu schaffen sowie die benötigten Antennen für GPS, ITS-G5 und Sensoren zu installieren. Die Software wird abschließend schrittweise in Betrieb genommen und in realen Verkehrssituationen getestet. Schlussendlich wird die aus dem Vorhaben resultierende Verringerung der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs anhand geeigneter Messungen in realen Verkehrssituationen quantifiziert und ausgewertet.

3 Hauptteil

3.1 Systemerweiterung des Online Calibration Tools

Einen zentralen Bestandteil zur Umsetzung der Projektziele stellt das Online Calibration Tool (OCT) dar. Bei dem OCT handelt es sich um ein eingebettetes System zum Zugriff auf Fahrzeugsteuergeräte über Entwicklungsschnittstellen. Mit Hilfe des OCTs können – den entsprechenden Entwicklerzugang auf das Steuergerät vorausgesetzt – Parameter des Regelungsmodells angepasst und Messdaten ausgelesen und dargestellt werden.



Abbildung 3-1 VEMAC OCT Hardware

Im Rahmen des STEP Projekts wurde das OCT um diverse Funktionen erweitert und bestehende Funktionen verbessert, um zum einen die Integration weiterer Sensorik zu ermöglichen und zum anderen Nutzbarkeit von Funktionen, die über den Einsatz als Kalibriersystem hinausgehen, zu verbessern.

Im Mittelpunkt stand zunächst die Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit. Aufgrund seines Aufbaus als eingebettetes Linux-System stehen grundsätzlich der volle Leistungsumfang und die Flexibilität eines Linux-Systems zur Verfügung. Damit der Anwender nicht mit der Kommandozeile und der Vielzahl von Konfigurationsdateien, z.B. für die Netzwerkkonfiguration, konfrontiert wird, wurde ein webbasiertes Konfigurationsinterface implementiert, wie es z.B. auch von Home-Routern bekannt ist. Über diesen „OCT-Manager“, kann der Benutzer Hardware-Konfigurationen, Netzwerk-Einstellungen, Software-Updates und benutzerdefinierte „Apps“ verwalten.

Über die integrierte App-Verwaltung können benutzerdefinierte Anwendungspakete im OCT definiert und hochgeladen werden. Ein App-Paket besteht dabei aus einer Archiv-Datei mit den für die Anwendung benötigten Dateien und einer Beschreibungsdatei, in der Meta-Informationen wie Name und Version sowie Informationen zum Installieren und Starten der Anwendung hinterlegt sind. Die App-Verwaltung im OCT-Manager bietet eine grafische Schnittstelle zum Hinzufügen und Entfernen sowie zum Starten und Stoppen der Apps (Abbildung 3-2).

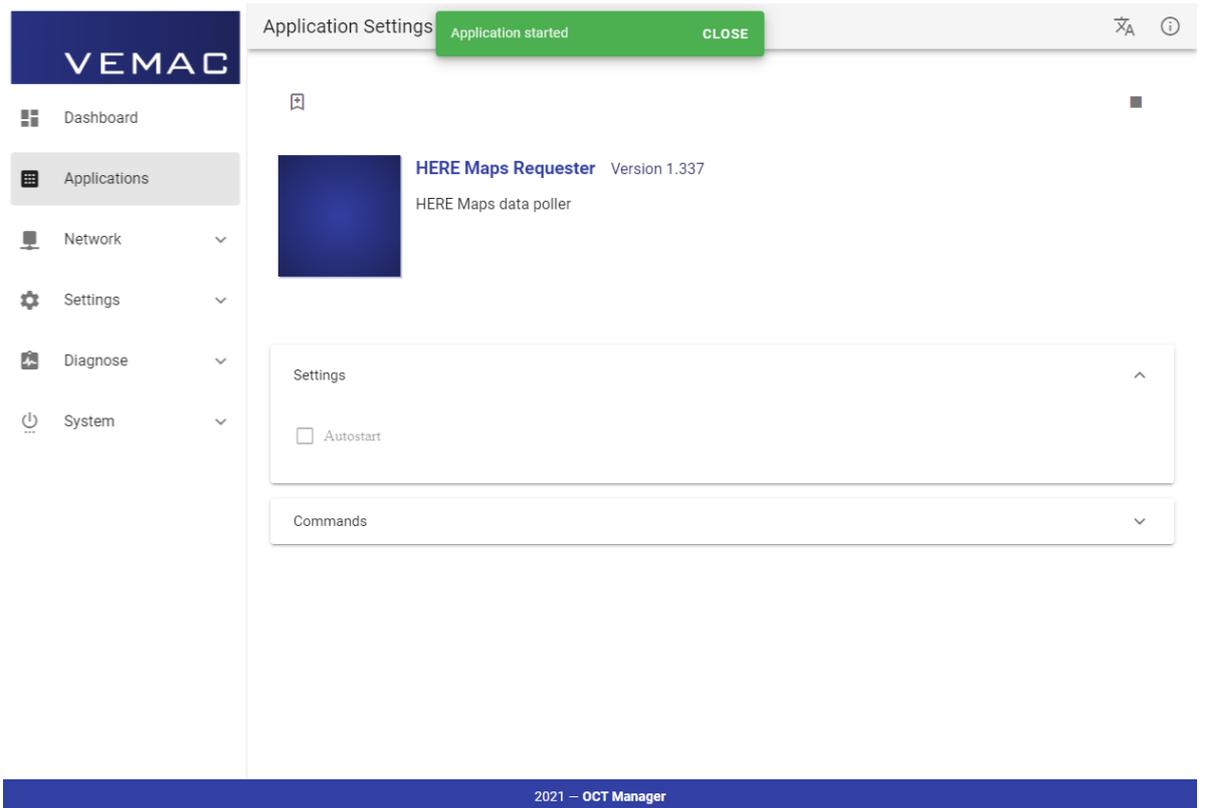


Abbildung 3-2 Detailansicht einer auf dem OCT installierten Applikation

Bei der Entwicklung der Apps können verschiedene Programmier- und Skriptsprachen eingesetzt werden. Neben der Möglichkeit, direkt ausführbare Binärdateien in den Paketen zu hinterlegen, welche direkt gestartet werden können, können auch Skripte (z.B. Nodejs oder bash) verwendet werden. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, Programmquellcode in den Paketen zu hinterlegen, welcher dann bei der Installation des Paketes zunächst kompiliert wird. Durch die offene TCP-Schnittstelle des OCTs haben die Apps die Möglichkeit, auf den Daten-Pool des OCTs zuzugreifen und so die Signale aus den angeschlossenen Steuergeräten, Sensoren und Datenbussen zu verwenden und gegebenenfalls auch zu modifizieren.

Die Simulink-Toolchain, welche die grafische Modellierung von auf dem OCT ausführbaren Anwendungen erlaubt, wurde so angepasst, dass beim Build eines Modells in Simulink automatisch ein solches App-Paket erzeugt wird, welches dann über den OCT-Manager auf dem OCT installiert werden kann.

3.1.1 Integration neuer Datenquellen

Das OCT besaß bisher die Möglichkeit, über die Kalibrierschnittstellen CCP und XCP über den Entwicklungszugang auf Steuergeräte zuzugreifen. Darüber hinaus standen über intern angeschlossene Sensoren GPS-Positionsdaten und Beschleunigungsdaten zur Verfügung.

Das OCT war von vornherein modular konzipiert, sodass die Erweiterung des internen Datenpools um weitere Datenquellen möglichst problemlos erfolgen kann.

Im Verlauf des STEP Projektes wurden die folgenden zusätzlichen Datenquellen ergänzt:

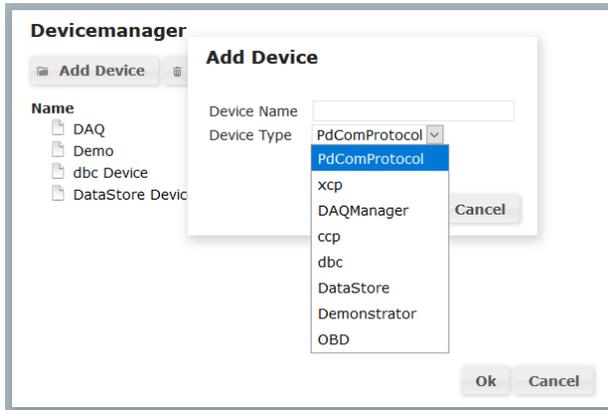


Abbildung 3-3 Device Manager der OCT Weboberfläche

3.1.1.1 CAN / DBC

Zur Datenübertragung zwischen Steuergeräten untereinander oder zwischen Sensorclustern und Steuergeräten kommen im Fahrzeug meistens CAN-Datenbusse zum Einsatz. Bei diesem Bus-System werden die einzelnen Signale mit einer festen Identifikationsnummer versehen und vom sendenden Knoten an alle Busteilnehmer im Broadcast-Verfahren übermittelt. Zur Dekodierung der Daten werden lediglich Informationen über die jeweilige Identifikationsnummer sowie die Datenrepräsentation benötigt. Diese können vom Hersteller über standardisierte Beschreibungsdateien, sogenannte CAN-DB (.dbc) Dateien bereitgestellt werden (vergleiche Abbildung 3-4).

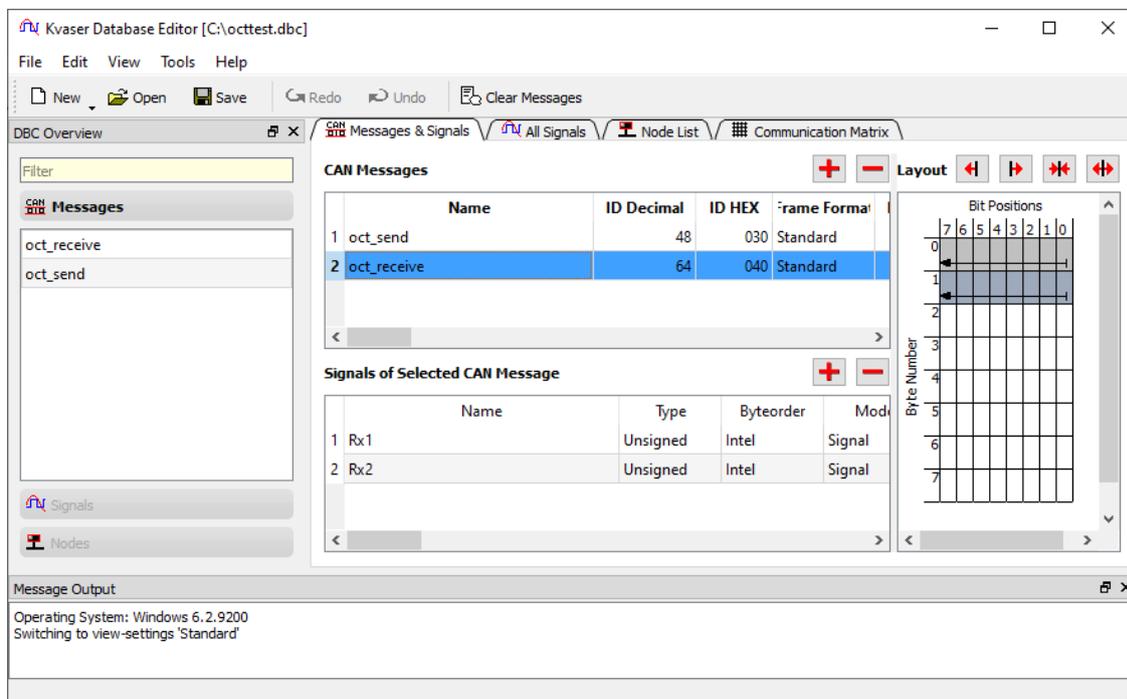


Abbildung 3-4 Darstellung einer dbc Datei im Kvaser Database Editor

Die OCT-Hardware besaß bereits zwei physikalische CAN-Schnittstellen, welche bisher nur für CCP und XCP Kommunikation verwendet wurden. Zum Empfang generischer CAN-Daten wurde der OCT-Server um eine logische Schnittstelle erweitert. Über die OCT Weboberfläche kann der Anwender unter Angabe einer dbc Datei eine neue dbc-Datenquelle hinzufügen (vgl. Abbildung 3-3). Die vom CAN-Bus empfangenen Daten werden mithilfe der Informationen aus der dbc Datei in physikalische Größen umgerechnet und im OCT-Datenpool analog zu den Daten aus anderen Quellen zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, als aktiver Knoten am CAN-Bus teilzunehmen und ausgewählte Daten als sendender Knoten zu übertragen. Die zu sendenden Daten werden periodisch übertragen und können über die Weboberfläche manuell definiert werden, oder aus Skripten erzeugt werden.

Insbesondere die im Projekt im Fokus stehenden Radar-, Lidar- und Kamerasysteme übertragen die Daten der erkannten Objekte über eine CAN-Schnittstelle. Durch die neue Schnittstelle können diese Daten im OCT erfasst und in den Regelungsmodellen verwendet werden. Unter der Voraussetzung, dass ein Zugang zum entsprechenden CAN-Bus hergestellt werden kann, und die Datenkodierung bekannt ist, kann dafür auch Sensorik verwendet werden, die bereits serienmäßig im Fahrzeug integriert ist (z.B. durch das Vorhandensein von Abstandstempomaten oder Notbremsystemen).

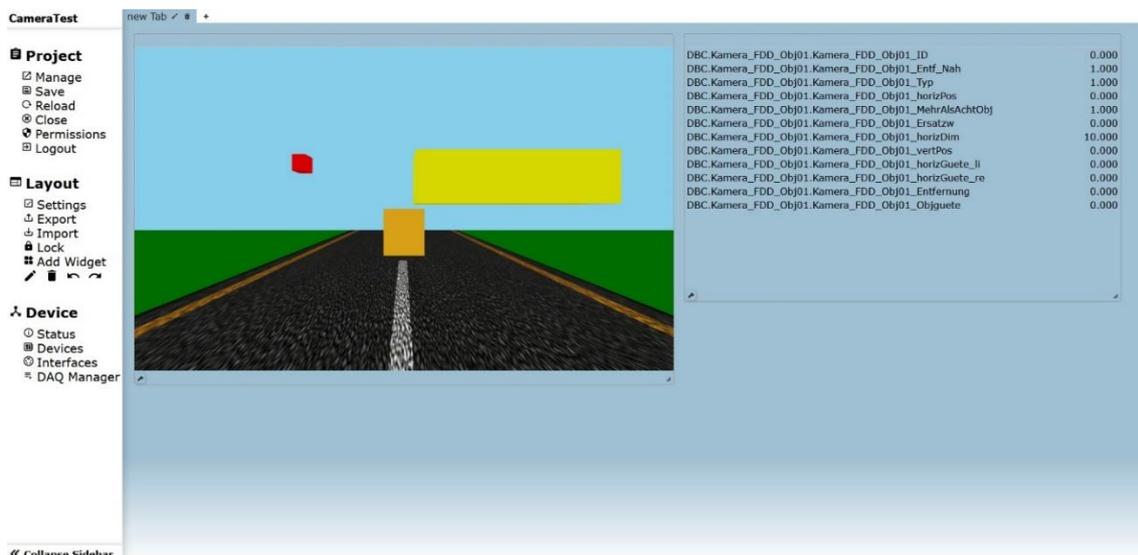


Abbildung 3-5 Darstellung von Kameradaten vom CAN Bus auf der OCT Weboberfläche

In Abbildung 3-5 werden die von der Kamera über den CAN-Bus gesendeten Daten in der OCT-Weboberfläche als Livedaten dargestellt. Hierbei stehen verschiedene Möglichkeiten zur Darstellung der Daten wie z.B. Listen, Tachometer oder Streifen-schreiber zur Verfügung. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, benutzerdefinierte Anzeigen zu programmieren, wie in der Abbildung anhand der grafischen Darstellung der Kameraobjekte in einer 3D-Szene gezeigt.

3.1.1.2 OBD

In der Regel verfügen moderne Fahrzeuge über eine On-Board-Diagnostik, welche die Funktion von Verbrennungssystem und Abgasnachbehandlung überwacht. Fehlermeldungen der On-Board-Diagnose, sowie einige ausgewählte Motor- und Fahrzeugdaten, können über eine genormte OBD-2 Schnittstelle ausgelesen werden. Während ein voller Zugang zum Motorsteuergerät über die Kalibrierschnittstellen (CCP/XCP) meist nur bei speziellen Entwicklungssteuergeräten möglich ist, besteht in beinahe jedem Serienfahrzeug ein (eingeschränkter) Zugang zu Motor- und Abgasnachbehandlungsdaten über die OBD-2 Schnittstelle.

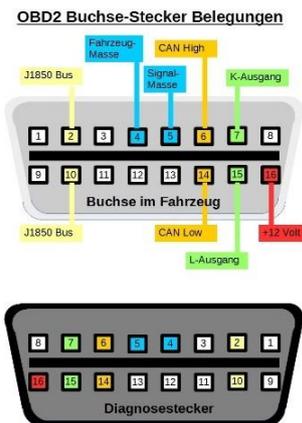


Abbildung 3-6 OBD-2 Buchse, Quelle: Von Losch - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38352330>



Abbildung 3-7 OBD-2 USB-Adapter.

Abbildung 3-6 zeigt den üblichen Diagnosezugang welcher im Fahrerfußraum, der Mittelkonsole oder im Handschuhfach zu finden ist. Mithilfe eines Diagnose-Adapters wie in Abbildung 3-7 dargestellt kann eine Verbindung zu einem PC oder auch zur USB-Schnittstelle des OCT hergestellt werden. Der OCT-Server wurde um eine weitere Datenquelle zur Nutzung dieser Diagnose-Adapter erweitert. Ein entsprechender Daten-Endpunkt kann über die Web-Schnittstelle des OCTs hinzugefügt werden (vgl. Abbildung 3-3). Die ausgelesenen Daten werden wie von den anderen Datenquellen gewohnt zur Visualisierung und Weiterverarbeitung im Datenpool bereitgestellt.

Dadurch, dass über die OBD-Schnittstelle nur eine eingeschränkte Anzahl von Betriebsparameter zur Verfügung steht, ist die Nutzbarkeit dieser Schnittstelle für die Entwicklung relativ beschränkt. Interessante Perspektiven ergeben sich allerdings für Versuchsaufbauten, bei denen neben dem eigentlichen Versuchsträger die Interaktion mit weiteren Verkehrsteilnehmern analysiert werden soll. Mit Hilfe je eines OCTs können ohne die Ausrüstung der Fahrzeuge mit teurer Messtechnik deren Bewegungs- und Betriebsdaten erfasst, gespeichert und gegebenenfalls auch über eine mobile Internet-Verbindung mit dem Versuchsfahrzeug ausgetauscht werden.

3.1.1.3 Cloud-Anbindung

Von verschiedenen Anbietern von Online-Kartendaten können neben der geplanten Route auch verschiedene Metadaten zum abgefragten Kartenmaterial wie z.B. Straßenverlauf, Höhenprofil und Geschwindigkeitslimits sowie Echtzeitdaten zum Verkehrsfluss, Stau usw. abgefragt werden. Da die Daten von den Nutzern erhoben werden, ist die Güte der Verkehrsflussdaten insbesondere auf dicht-befahrenen Straßen größer.

Eines der Ziele des Projektes war zu analysieren, inwieweit diese Informationen genutzt werden können, um die Betriebsstrategie eines Verbrennungs- oder Hybridfahrzeuges unter Berücksichtigung des Routenverlaufs und des Verkehrsaufkommens zu verbessern. Um die Daten in einer Regelstrategie nutzbar zu machen, wurde ein Konzept zur Erfassung der Daten und Bereitstellung über den Datenpool des OCTs entwickelt und umgesetzt.

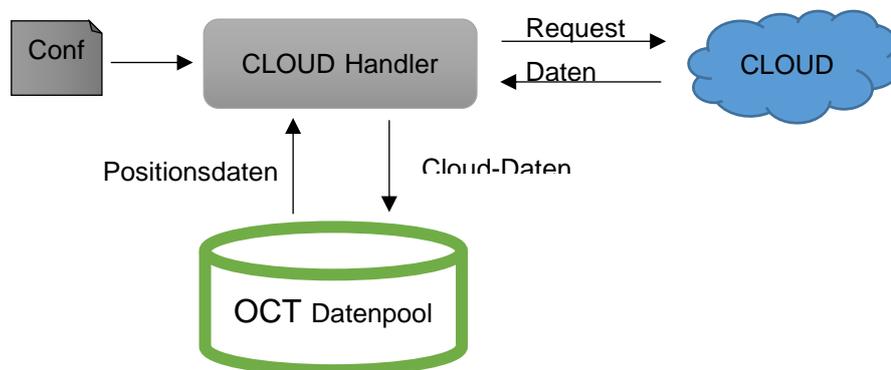


Abbildung 3-8 Bezug von Daten eines Geodaten-Anbieters

Die Daten können von den Anbietern in der Regel mit Hilfe des HTTP-Protokolls über das Internet abgefragt werden. Dabei stehen meist verschiedene API-Schnittstellen zur Verfügung, die allerdings – abgesehen vom Übertragungsprotokoll – nicht genormt sind. Für die exemplarische Umsetzung wurden zunächst die verfügbaren Daten der Anbieter Google und HERE Maps auf ihre Eignung geprüft und die Daten verglichen. Beide Anbieter liefern eine hohe Datengüte. Da bei den kostenlos nutzbaren Daten der Firma HERE ein leicht höherer Detaillierungsgrad in Bezug auf Informationen zum Straßenverlauf und Verkehrsfluss vorliegt, wurde im Projekt eine Anbindung an die HERE Daten umgesetzt.

Da die Abfrage und Vorverarbeitung der Daten sehr abhängig von dem jeweiligen Anwendungs-Szenarium und vom verwendeten Daten-Anbieter sind, ist es nicht sinnvoll, diese direkt im OCT-Server umzusetzen. Stattdessen wurde die Möglichkeit

genutzt, separate Apps auf der OCT-Hardware ausführen zu können, welche über die verfügbare Anwendungsschnittstelle auf den OCT-Datenpool zugreifen können. Die HERE-Maps Datenanbindung wurde als App in Form einer Nodejs/Javascript-Anwendung umgesetzt und kann über die App-Verwaltung des OCT-Managers auf dem System installiert und gestartet werden (vergleiche Abschnitt 3.1). Für die Abfragen der REST-Schnittstelle sowie die Kommunikation mit dem OCT-Server konnten frei verfügbare Nodejs Bibliotheken verwendet werden. Das Skript kann die für die zyklisch erfolgende Anfrage an den HERE Server auf die aktuellen Positionsdaten und das gewählte Ziel über den OCT Datenpool zugreifen, und die ausgewertete Antwort wiederum in den Datenpool zurückschreiben, so dass diese von auf dem OCT ausgeführten Regelungen verwendet werden können.

Aufgrund des Aufbaus des OCTs als eingebettetes Linux-System ist die Nutzung von Internet-Services bei Vorhandensein einer entsprechenden Netzwerk-Verbindung problemlos darstellbar. Beim Betrieb im Fahrzeug musste eine Möglichkeit geschaffen werden eine mobile Internetverbindung über ein 4G Funknetzwerk nutzbar zu machen. Da die meisten Mobiltelefone die Möglichkeit bieten ihre Internet-Verbindung über einen WLAN-Hotspot auch anderen Geräten zur Verfügung zu stellen, und das OCT über eine WLAN-Schnittstelle verfügt, bietet sich diese einfache und kostengünstige Lösung an. Die OCT WLAN-Schnittstelle wurde bisher ausschließlich als Access-Point verwendet, an dem sich Client-Geräte zur Nutzung der OCT-Oberfläche anmelden konnten. Um diese Richtung umzukehren, wurde die WLAN-Konfiguration im OCT-Manager entsprechend erweitert, so dass neben dem Access-Point-Modus auch die Möglichkeit besteht einem bestehenden Funknetzwerk beizutreten (vergleiche Abbildung 3-9). (Die Nutzung der Weboberfläche ist auch in dieser Konstellation möglich).

Darüber hinaus soll in Zukunft die Möglichkeit geschaffen werden die Internet-Verbindung durch einen an die USB-Schnittstelle des OCT anschließbaren LTE-Datenstick herzustellen.

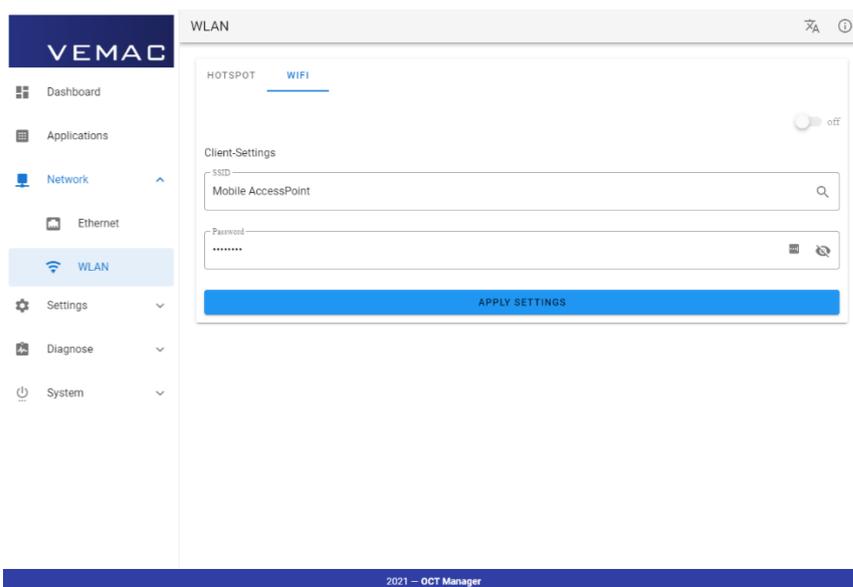


Abbildung 3-9 Konfigurationsoberfläche des Access Points des OCTs

3.1.1.4 DataStore

Im OCT werden die Daten aller angeschlossenen Sensoren und Steuergeräte im Datenpool aggregiert. Dabei sind alle Signale mit einem Sensorwert und alle Parameter mit der Charakteristik einer bestimmten Funktion im angeschlossenen Steuergerät verknüpft. Um die Möglichkeit zur Ablage beliebiger Daten z.B. zum Austausch zwischen einem Skript und einem Simulink-Modell zu schaffen, wurde eine Hilfs-Datenquelle, der „DataStore“ implementiert. Dieser kann wie ein XCP oder dbc Steuergerät über die Weboberfläche hinzugefügt werden (Abbildung 3-3) und definiert dann mit Hilfe einer Beschreibungs-Datei im JSON-Format eine beliebige Anzahl an Daten-Austausch-Variablen. Dies wurde insbesondere für die Kommunikation mit dem HERE-Skript benötigt (vgl. Abbildung 3-10).

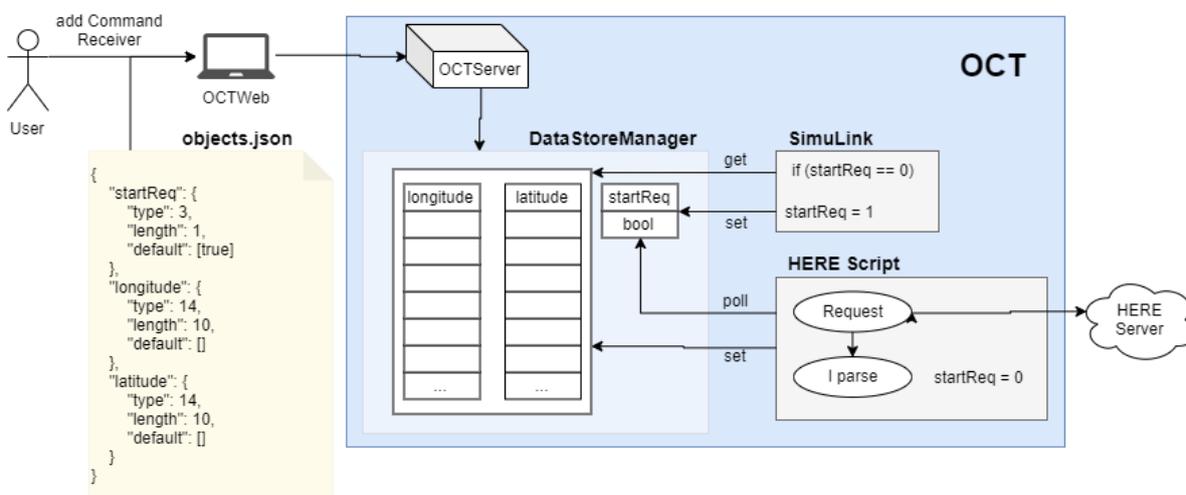


Abbildung 3-10 Kommunikation zwischen Simulink-Modell und HERE Maps Script über den DataStore

3.1.1.5 PdCom

Das Etherlab Open-Source-Projekt stellt eine Toolchain zur Verwendung von Simulink zur Modellierung von Echtzeitfähigen Prüfstandssteuerungen unter Linux bereit. Ein Bestandteil dieser Toolchain ist das Kommunikations-Protokoll PdCom, mit dessen Hilfe auf die Prozessdaten eines Prüfstandssystems zur Datenerfassung und zur Kalibrierung verwendet werden kann. Die OCT-Simulink-Toolchain, mit deren Hilfe Simulink-Modelle zur Ausführung auf dem OCT erstellt werden können, basiert auf dem Etherlab Projekt und hat daher auch die PdCom Schnittstelle zur Prozessdaten-Kommunikation integriert. Damit die Simulink-Modelle auf dem OCT nicht nur die Daten aus dem Datenpool des OCTs nutzen können, sondern andererseits auch die Prozessdaten der Modelle auf der OCT Weboberfläche dargestellt und modifiziert werden können (Abbildung 3-11), wurde der OCT-Server um eine Datenschnittstelle für das PdCom Protokoll erweitert (Abbildung 3-3).

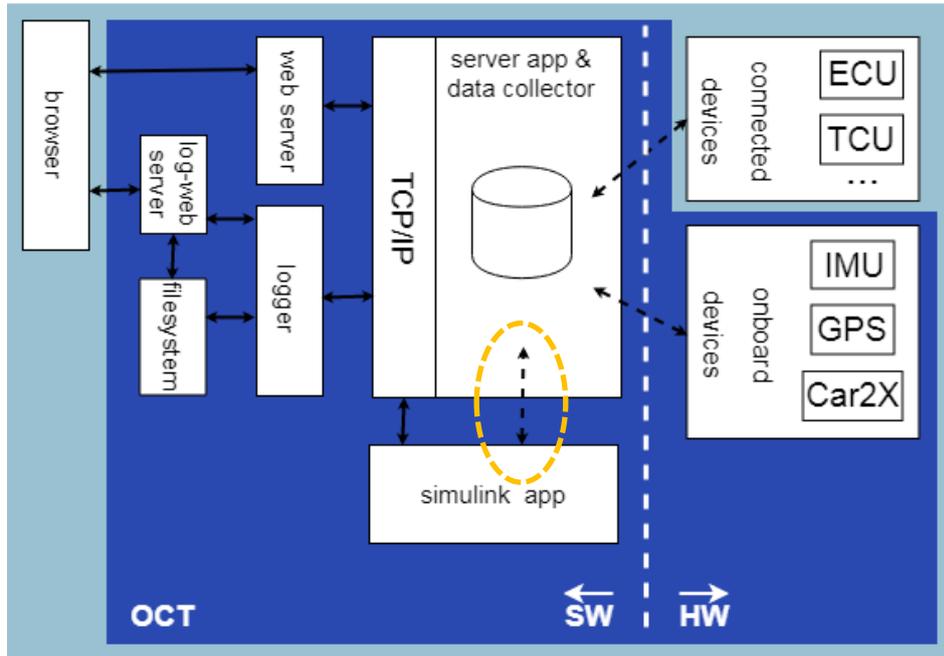


Abbildung 3-11 PdCom Schnittstelle zur Simulink-App im OCT-Gesamtkontext

3.1.2 Datenlogger

Die Weboberfläche des OCT ist nur zur Visualisierung der momentanen Daten der angeschlossenen Geräte konzipiert. Datenreihen können nur sehr eingeschränkt über einen integrierten Streifenschreiber über einen sehr begrenzten Zeitraum dargestellt, aber nicht abgespeichert werden. Zur Aufnahme von Langzeit-Datenreihen, welche im Nachhinein analysiert werden können, wurde eine Logger-App konzipiert und implementiert.

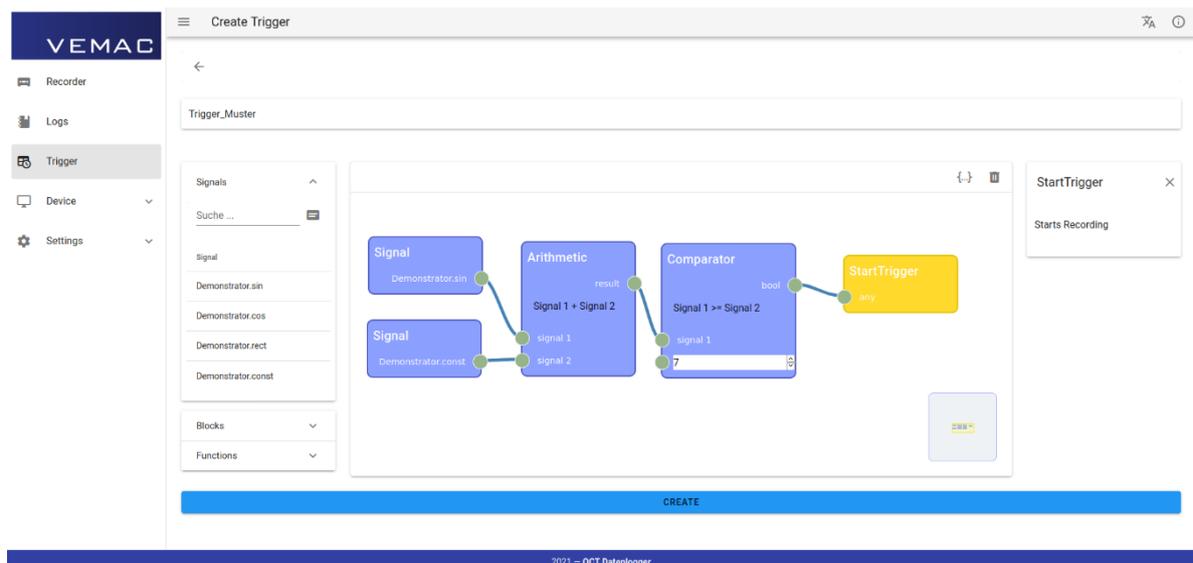


Abbildung 3-12 Trigger Ansicht in der Weboberfläche des Datenloggers

Die Logger-App greift über dieselbe Schnittstelle auf den OCT-Server zu, die auch von der Weboberfläche oder den Simulink-Apps verwendet wird. Dadurch stehen alle Daten des OCT-Datenpools zur Speicherung als Datenreihe zur Verfügung. Die Konfiguration der zu loggenden Daten, sowie der Export der Logdaten erfolgt über ein eigenes, von der OCT-Weboberfläche getrenntes Webinterface. Starten und Stoppen von Messungen kann mithilfe dieser Oberfläche entweder manuell oder mithilfe von flexibel definierbaren Triggern erfolgen (Abbildung 3-12). Die Datenreihen werden in einer internen SQLite Datenbank gespeichert und können zur Weiterverarbeitung in verschiedene Standardformate wie CSV oder MDF exportiert werden.

3.2 Konzeptionierung prädiktiver Fahrzeugsteuerungsalgorithmen

3.2.1 Simulationsstudie für ein Mild-Hybrid Fahrzeug: Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch pulsierendes & gleitendes Fahren

Motivation

Ein automatisiertes Längsführungssystem nimmt dem menschlichen Fahrer die Aufgabe ab, die Fahrzeuggeschwindigkeit zu planen und einzuregulieren. Geschicktes Anpassen der Geschwindigkeit an die zu fahrende Strecke, die anderen Verkehrsteilnehmer und die Ampelschaltzeiten kann zu Energieeinsparungen im zweistelligen Prozentbereich führen. Vor dem Hintergrund der steigenden Durchdringungsrate von Mildhybridfahrzeugen gewinnt der gezielte Einsatz von Segeln und Rekuperieren beim Längsführungsdesign an Bedeutung. Die Segelfunktion bleibt in den meisten Fällen unbenutzt, wenn sie in der Längsführung nicht explizit berücksichtigt wird. Die Mildhybridtechnologie ermöglicht ferner den kraftstoffsparenden Pulse und Glide (PnG) Betrieb, dessen Geschwindigkeitsprofil aus abwechselnden Beschleunigungs- und Segelphasen besteht.

Ziel

Es wird ein vorausschauendes Längsführungssystem vorgestellt, das die obigen Stellhebel zur Reduktion des Energieverbrauchs einschließlich der PnG Strategie berücksichtigt und durch Abschalten von Teilfunktionen sowohl für verbrennungsmotorisch betriebene als auch batteriebetriebene Fahrzeuge eingesetzt werden kann. Für die Langzeitplanung (LZP) wird ein Algorithmus mit Namen Waterfilling entwickelt, der den (hinsichtlich der Energie am Rad) minimalen Geschwindigkeitsverlauf zum Erreichen der Zielgrünphase der nächsten Lichtsignalanlage mit geringem Rechenaufwand findet und zugleich frei von den aufgezeigten Schwächen der Diskreten Dynamischen Programmierung mit zweidimensionalem Suchraum ist. Der Algorithmus wird mit der in dieser Arbeit entwickelten Technik der Alphaadaption und einer wirkungsgradgünstigen Anfahrtsplanung auf rote Lichtsignalanlagen kombiniert. Für die Kurzzeitplanung wird ein regelbasierter Ansatz verwendet, der die für die grundlegenden Fahrmanöver bereits bekannten verbrauchsoptimalen Verzögerungsprofile sowie den PnG Betrieb unter Berücksichtigung des Fahrkomforts recheneffizient implementiert.

Die Funktionsarchitektur der Längsführung

Die Längsführung umfasst die in Abbildung 3-13 dargestellten Funktionen.

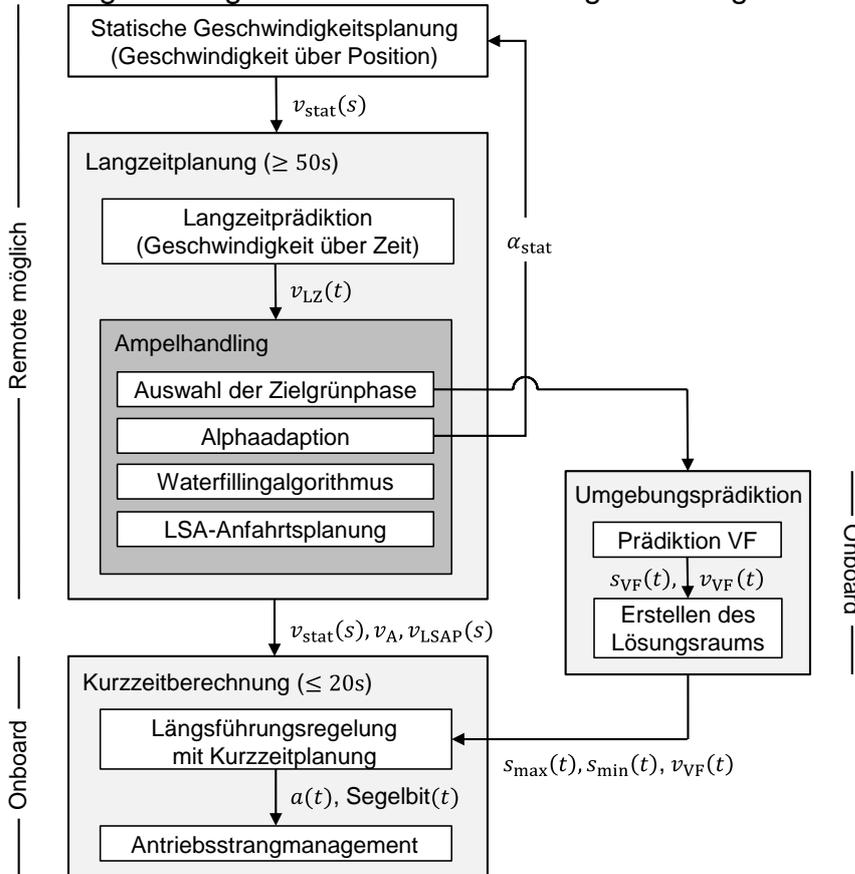


Abbildung 3-13: Funktionsarchitektur der Fahrzeuglängsführung.

Die Eingangsgrößen (nicht dargestellt) sind die Position und Schaltzeiten der nächsten Lichtsignalanlage (LSA), die statischen Routeninformationen, der Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug (VF) und ggfs. die Positionen und Geschwindigkeiten weiterer Verkehrsteilnehmer (VT) sowie die Anzahl bzw. Dichte an Verkehrsteilnehmern zwischen dem Egofahrzeug und der nächsten LSA.

Die statische Geschwindigkeitsplanung erzeugt einen Geschwindigkeitsverlauf als Funktion des Ortes. Zunächst wird eine Maximalgeschwindigkeit berechnet, die sich aus der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, Stoppschildern, Kurvenradien und Bremsschwellen ergibt. Anschließend werden zum Anfahren von Geschwindigkeitsreduktionen Geschwindigkeitsverläufe als Funktion des Ortes entsprechend der CR-Strategie, bei der zuerst gesegelt und dann rekuperiert wird, berechnet. Das Minimum aus den Verzögerungsverläufen und der berechneten Maximalgeschwindigkeit ergibt den statischen Geschwindigkeitsverlauf als Funktion des Ortes.

Die Langzeitprädiktion erzeugt einen Geschwindigkeitsverlauf als Funktion der Zeit, indem der statische Geschwindigkeitsverlauf mit einem ACC Regler nachgefahren wird. Geschwindigkeitserhöhungen erfolgen dadurch nicht instantan, sondern mit der Beschleunigung des ACC Reglers. Der ACC-Regler wird dabei dahingehend erweitert, dass er den CR-Verläufen zum Anfahren der Geschwindigkeitsreduktionen ohne Abweichung folgt.

Im Block Ampelhandling wird zunächst für die nächste LSA die nächstmögliche Grünphase ausgewählt, die mit dem Geschwindigkeitsverlauf der Langzeitprädiktion erreicht werden kann. Wird innerhalb des Zeithorizonts der Langzeitprädiktion die LSA bei grün erreicht, ist diese Grünphase die Zielgrünphase, ansonsten die darauffolgende. Wird die Zielgrünphase bei Rot erreicht, werden die Segelanteile der CR-Abschnitte der statischen Geschwindigkeitsplanung erhöht, um die mittlere Geschwindigkeit zu verringern und damit die voranliegende LSA später zu erreichen. Das Erhöhen der Segelanteile wird durch iteratives Vergrößern von α_{stat} erreicht (α_{stat} beschreibt den Segelanteil) und erhält deshalb den Namen Alphaadaptation. Bei der Auswahl der Zielgrünphase kann auch der Verkehr berücksichtigt werden, um beurteilen zu können, ob eine Grünphase blockiert ist.

Der Waterfillingalgorithmus berechnet aus den Schaltzeiten der ausgewählten Grünphase, der Position der LSA und dem Geschwindigkeitsverlauf der Langzeitprädiktion einen im Sinne der Energieminimierung am Rad optimalen Geschwindigkeitsverlauf, der die Grünphase zu deren Beginn erreicht. Aufgrund der Form der energieoptimalen Lösung kann der Geschwindigkeitsverlauf durch eine einzige Geschwindigkeitskonstante v_A beschrieben werden, vorausgesetzt der statische Geschwindigkeitsverlauf $v_{\text{stat}}(s)$ wird der unterlagerten Längsführungsregelung ebenfalls bereitgestellt.

Die Lichtsignalanlagen-Anfahrtsplanung (LSAP) wird für Mildhybridfahrzeuge eingesetzt und erweitert den Waterfillingalgorithmus um eine wirkungsgradgünstige LSA-Anfahrt, bei der eine Mindestgeschwindigkeit $v_{\text{min,LSA}}$ bei der Zufahrt auf die nächste LSA nicht unterschritten wird und das Fahrzeug vor einer roten LSA mit einem CR-Profil zum Stillstand gebracht wird. Die Kombination aus Mindestgeschwindigkeit und CR-Profil ergibt den Geschwindigkeitsverlauf der LSAP v_{LSAP} .

Die Längsführungsregelung mit Kurzzeitplanung (KZP) berechnet einen Sollbeschleunigungs- und einen Segelbitverlauf für einen im Vergleich zum Horizont der Langzeitprädiktion kurzen Zeithorizont \mathfrak{P}_A . Das Segelbit gibt an, zu welchen Zeitpunkten sich das Fahrzeug im Zustand Segeln befindet. Der Zeithorizont \mathfrak{P}_A ist maximal so lang wie der in der KZP verwendete Prädiktionshorizont $\mathfrak{P}_H = [0, t_H]$, $t_H \in \mathbb{R}$. In der Regel reicht es aus, wenn \mathfrak{P}_A nur einige Sekunden lang ist, damit im Antriebsstrangmanagement anhand des Zeitintervalls, für das das Segelbit gesetzt ist, die Wahl zwischen Motor-Aus oder Motor-Leerlauf entschieden werden kann. Für das in dieser Arbeit verwendete regelbasierte Antriebsstrangmanagement ist es ausreichend, die Sollbeschleunigung und das Segelbit für den nächsten Zeitschritt zu kennen.

Die Längsführungsregelung mit KZP realisiert vorausschauende Verzögerungsvorgänge bei der Zufahrt auf Vorderfahrzeuge und den kraftstoffsparenden Pulse und Glide Betrieb. Bei der Planung der PnG Strategie werden die in [16] aufgeführten Anforderungen an den Fahrkomfort (Begrenzung von Ruck, Beschleunigung und Ausrollzeit) eingehalten, um eine Level 8 (Lv8) Kalibrierung zu erreichen – eine Kalibrierung, bei der der PnG Betrieb nur von kritischen Kunden bemerkt wird.

Eingangsgrößen der Längsführungsregelung mit KZP sind der statische Geschwindigkeitsverlauf v_{stat} , die Konstante v_A , der Geschwindigkeitsverlauf der LSAP v_{LSAP} , und der prädizierte Lösungsraum. Der Lösungsraum besteht aus den zwei Funktionen s_{max} und s_{min} zur Positionsbegrenzung und dem prädizierten Geschwindigkeitsverlauf des VFs, v_{VF} . Die obere Positionsgrenze s_{max} wird aus der prädizierten Position des VFs und den Daten der ausgewählten Grünphase (Position und Schaltzeiten der LSA) berechnet: $s_{\text{max}} = \min(s_{\text{max,VF}}, s_{\text{max,LSA}})$. Die untere Positionsgrenze s_{min} wird nur aus den Daten der ausgewählten Grünphase berechnet: $s_{\text{min}} = s_{\text{min,LSA}}$. Abbildung 3-14 stellt die Positionsgrenzen beispielhaft dar.¹

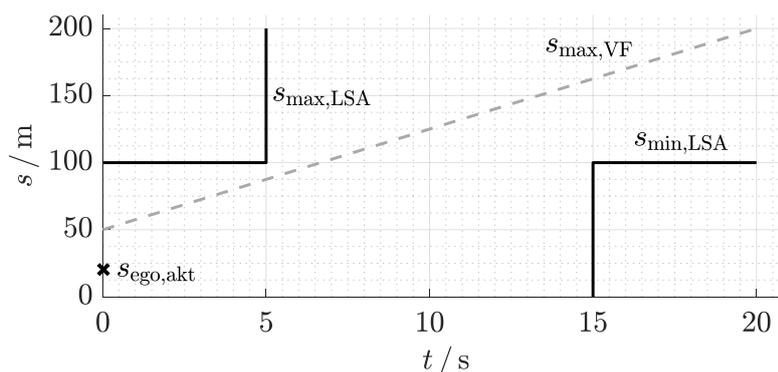


Abbildung 3-14: Anhand der Schaltzeiten der LSA und dem prädizierten Verlauf des VFs werden die Positionsgrenzen gebildet, die das Egofahrzeug nicht überschreiten bzw. unterschreiten darf. Die LSA ist zwischen Sekunde 5 und 15 grün.

Für die Prädiktion des VFs wird im einfachsten Fall eine konstante Geschwindigkeitsextrapolation verwendet. Hierfür reicht die Erfassung der aktuellen Relativedistanz und -geschwindigkeit mit On-Board Sensoren aus. Falls eine Kommunikation mit den Vorderfahrzeugen des VFs möglich ist, kann die Geschwindigkeit jedes Fahrzeugs in der erfassten Fahrzeugkette bis hin zum unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeug durch ein Fahrermodell (in diesem Fall das Gipps Modell) prädiziert werden², sodass z.B. ein in der Zukunft liegender Verzögerungsvorgang des VFs prädiziert werden kann, wenn sich das erste Fahrzeug in der Kette mit langsamerer Geschwindigkeit fortbewegt. Dies ermöglicht das frühzeitige Einleiten von Verzögerungsvorgängen für das Egofahrzeug.

Das Antriebsstrangmanagement verwendet den Sollbeschleunigungs- und Segelbitverlauf der Längsführungsregelung zum Ansteuern der Antriebsaggregate im nächsten Zeitintervall. Dies umfasst im Hybridfall die Aufteilung der Drehmomente zwischen Verbrennungskraftmaschine (VKM) und Elektrischer Maschine (EM), das Öffnen der Kupplung und das Starten und Abstellen der VKM. Im Fall des batterieelektrischen Fahrzeugs wird aus dem Sollbeschleunigungsverlauf das Drehmoment für die EM berechnet.

¹ Die Positionsgrenzen $s_{\text{max,LSA}}(t)$ und $s_{\text{min,LSA}}(t)$ können auch verwendet werden, um das Überqueren einer Kreuzung, die über keine LSA verfügt, zu ermöglichen, indem der Querverkehr als virtuelle LSA modelliert wird. Die virt. LSA erlaubt bzw. verbietet die Kreuzungsüberfahrt zu bestimmten Zeitintervallen.

² Für das Fahrzeug zu Beginn der Kette wird wieder eine konstante Geschwindigkeitsprädiktion zu Grunde gelegt.

Die statische Geschwindigkeitsplanung und die LZP können remote durchgeführt werden und es genügt, diese im Sekundentakt auszuführen. Die Ergebnisse der Kurzzeitberechnungen werden zum Ansteuern der Aktuatoren verwendet und sollten im 10ms oder 100ms Takt ausgeführt werden.

Die Validierung des Längsführungssystems

Das Längsführungssystem wird in einer dynamischen Simulationsumgebung validiert. Das Egofahrzeug bewegt sich zusammen mit anderen simulierten Verkehrsteilnehmern auf einem Rundkurs der Stadt Paderborn. Das Egofahrzeug kann auf Routendaten (Kurvenradien und Geschwindigkeitsbegrenzungen des Rundkurses), auf Position und Geschwindigkeit des VFs, sofern sich dieses innerhalb eines virtuellen Sensorkonus befindet, auf die Verkehrsdichte zwischen aktueller Position des Egofahrzeugs und nächster LSA und auf die Position und Schaltzeiten der nächsten LSA zugreifen. Es wird auch der Fall betrachtet, dass das Egofahrzeug mit den Vorderfahrzeugen per Funkschnittstelle Positions- und Geschwindigkeitsdaten austauschen kann.

Das Egofahrzeug und die simulierten VT bewegen sich innerhalb der Stadt Paderborn auf einem Rundkurs der Länge $L_{\text{Rund}} = 5\,863\text{ m}$, auf dem 14 LSA n positioniert sind (siehe Abbildung 3-15).

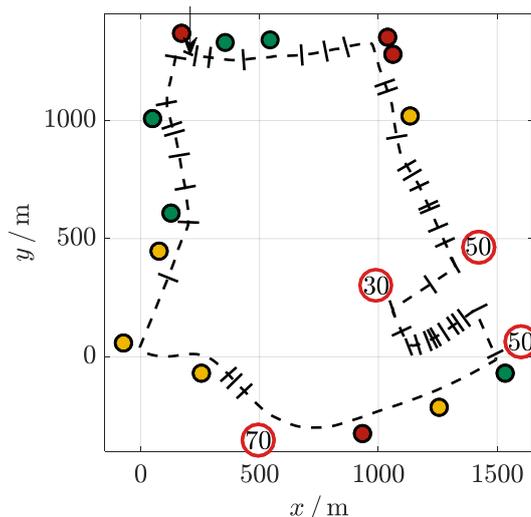


Abbildung 3-15: Rundkurs innerhalb der Stadt Paderborn. Die LSA n sind als Kreise eingezeichnet mit einer Momentaufnahme der Schaltzeiten. Die als Querbalken gekennzeichneten 42 Querstraßen besitzen keine LSA. Der Nullpunkt des Rundkurses wird kurz vor der ersten LSA definiert, gekennzeichnet durch den Pfeil. Die erste LSA erscheint nach 56,9m. Nummerierung der LSA n und Fahrtrichtung des Egofahrzeugs sind entgegen dem Uhrzeigersinn.

Die Verkehrsdichte lässt sich durch Variation der Anzahl an Verkehrsteilnehmern, N_{VT} , vor jeder Simulation einstellen. Die mittlere bzw. globale Verkehrsdichte ρ_{glob} berechnet sich wie folgt:

$$\rho_{\text{glob}} = N_{\text{VT}}/L_{\text{Rund}}.$$

Die in Abbildung 3-15 eingezeichneten 42 Querstraßen stellen die Verkehrsknotenpunkte dar, an denen die anderen VT abbiegen und wieder erscheinen können. Ist ein VT an einem Verkehrsknotenpunkt (VKP) abgebogen, erscheint er nach einer

zufälligen Zeitdauer an einem zufällig ausgewählten VKP wieder. Die VT folgen dem Intelligent Driver Model (IDM). Aufgrund der Stochastik, die durch die VT eingeführt wird, streuen i.d.R. Fahrzeit und Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch des Egofahrzeugs. Fahrzeit und Verbrauch werden durch Mittelwert und Standardabweichung beschrieben.

Das Streckenmodell

Aus Sicht des Längsführungssystems ist das Egofahrzeug die Regelstrecke. Das Antriebsstrangmanagement, das gemäß Abbildung 3-13 zum Längsführungssystem gehört, wird im Folgenden der Strecke zugeschlagen (für das Simulationsergebnis ist die Position belanglos). Das Streckenmodell erhält als Eingangsgrößen eine Sollbeschleunigung und eine Segelbitvorgabe.

Als Streckenmodell wird ein von FEV und dem Aachener Institut VKA gemeinsam entwickeltes Vorwärtsmodell eines P0 Mildhybridfahrzeugs verwendet. Schleppmoment und Kraftstoffverbrauch der VKM, Verlustmoment des Getriebes und der Wirkungsgrad des RSGs und DC/DC Wandlers werden durch Kennfelder abgebildet. Die Blei-Säure- und die Lithium-Ionen-Batterie werden jeweils durch eine vom Ladezustand, engl. State of Charge (SOC), abhängige offene Klemmenspannung, engl. Open Circuit Voltage (OCV), und einen temperatur- und SOC abhängigen Innenwiderstand (separat für Lade- und Entladefall) mit zwei seriell nachgeschalteten RC-Gliedern modelliert. Die Temperatur der Batterie wird durch ein thermisches Netzwerk abgebildet, bestehend aus einer Wärmekapazität und einem Wärmewiderstand für den Übergang von Batterie zur Umgebung. Die Parameter der Längsdynamik und des Antriebsstrangs können Tab. 3-1 und Tab. 3-2 entnommen werden. Die Lithium-Ionen-Batterie besitzt eine Kapazität von 0,365 kWh. Die maximale mechanische Reuperationsleistung des RSG ist spannungsabhängig und liegt zwischen 13 kW und 16 kW. Für das 12 V Bordnetz wird ein konstanter Verbrauch von 420 W angesetzt.

Fahrzeugleergewicht	$m_{\text{Fzg,leer}} = 1530 \text{ kg}$
Zusätzliches Gewicht durch Passagiere	$m_{\text{zus}} = 100 \text{ kg}$
Stirnfläche	$A_{\text{Fzg}} = 2,2 \text{ m}^2$
Luftwiderstandsbeiwert	$c_W = 0,27$
Dynamischer Radradius	$r_{\text{Rad}} = 0,3170 \text{ m}$
Geschwindigkeitsunabhängiger Rollwiderstandsfaktor	$f_0 = 0,0105$
Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandsfaktor	$f_1 = 0,0004 \text{ (m/s)}^{-1}$
Trägheitsmoment von Rad und Achse	$J_{\text{Rad}} = 0,95 \text{ kg/m}^2$

Tab. 3-1: Längsdynamikparameter für ein D-Segment Fahrzeug

Daten der VKM

Typ	Turboaufgeladener Ottomotor
Hubvolumen	$V_{\text{Hub}} = 2,01$
Maximales Antriebsmoment	$M_{\text{max,Antrieb}} = 350 \text{ Nm}, 1250 \text{ min}^{-1} - 4500 \text{ min}^{-1}$
Nennleistung	$P_N = 170 \text{ kW}, 4750 \text{ min}^{-1} - 6200 \text{ min}^{-1}$
Minimaler spezifischer KSV	$b_{e,\text{min}} = 230 \text{ g/kWh}$
Effizienz der VKM	η_{VKM} kennfeldbasiert
Kraftstoffmasse für Wiederstart	$m_{\text{B,Start}} = 0,5 \text{ g}$
Daten des Getriebes	
Typ	Achtgangautomatikgetriebe Längseinbau
Getriebeübersetzung	$[i_{\text{Getr}}(1) \dots i_{\text{Getr}}(8)] = [4,714; 3,143; 2,106; 1,667; 1,285; 1,000; 0,839; 0,667]$
Getriebeeffizienz	η_{Getr} kennfeldbasiert
Differentialgetriebeübersetzung	$i_{\text{Diff}} = 3,204$
Differentialgetriebeeffizienz	$\eta_{\text{Diff}} = 0,96$

Tab. 3-2: Daten des Antriebsstrangs

Zur Berechnung des KSVs pro simulierter Rundfahrt wird die Differenz zwischen dem Start- und Endwert des SOC in eine äquivalente Kraftstoffmenge

$$\Delta m_{\text{B,SOC,korr}} = \bar{b}_e \cdot W_{\text{Bat}} \cdot (\zeta_{\text{Start}} - \zeta_{\text{Ende}})$$

umgerechnet und dem simulierten KSV am Ende der Rundfahrt hinzuaddiert. Der spezifische Kraftstoffverbrauch \bar{b}_e repräsentiert die mittleren Kosten der Umwandlung von chemischer zu elektrischer Energie im Fahrzeug und wird mit 250 g/kWh beziffert.

Die Simulationsdurchläufe

Tab. 3-3 führt auf, welche Simulationsdurchläufe für das Mildhybridfahrzeug durchgeführt werden. LSA inaktiv bedeutet, dass keine LSA vorhanden bzw. jede LSA stets grün ist. KZP inaktiv bedeutet, dass die Beschleunigung ausschließlich vom ACC Regler vorgegeben wird. Gesegelt wird nur, wenn der statische Geschwindigkeitsverlauf ein Segelprofil vorgibt. Der Prädiktionshorizont der KZP wird auf 12 s bemessen. LZP aktiv bedeutet, dass der Waterfillingalgorithmus mit einem Horizont von $t_{\text{LZ}} = 50 \text{ s}$ und die Alphaadaption mit dem Zielwert $\alpha_{\text{stat}} = 0,5$ aktiv sind. Die statische Geschwindigkeitsplanung ist unabhängig davon, ob LZP oder KZP aktiv sind, und das Fahrzeug segelt bzw. rekuperiert stets entsprechend des CR Profils. Bei deaktivierter LZP kann keine Alphaadaption durchgeführt werden.

PnG-FZO steht für PnG Betrieb mit Fahrzeitorientierung und bedeutet, dass PnG nur dann freigegeben wird, wenn die Fahrzeit dadurch nicht verlängert wird, was der Fall ist, wenn $v_A < v_{\text{stat,akt}}$. Beim PnG Betrieb mit FZO wird die Mindestgeschwindigkeit auf $28 \text{ km/h} < 30 \text{ km/h}$ begrenzt (Parametervariation F), damit PnG auch in der 30er-

Zone aktiv ist.³ Der Wert sollte nicht weiter gesenkt werden, da die Vorausschaufunktionen erst bei Überschreiten von 25 km/h (einschließlich des PnG Betriebs) aktiviert werden. Bei Unterschreiten von 3 km/h werden sie wieder deaktiviert. Zur besseren Vergleichbarkeit wird die gleiche Mindestgeschwindigkeit auch für den PnG Betrieb ohne FZO verwendet. Bei Verkehr beschränken sich die Untersuchungen auf die Lv8 Kalibrierung.

Da innerhalb jeder ID maximal ein Parameter variiert wird, kann die ID um eine Ziffer ergänzt werden, um sich auf genau eine Parametereinstellung beziehen zu können. So bezeichnet „B.2“ die Parametereinstellung mit $\alpha_{\text{stat}} = 0,5$. Die Parametereinstellungen mit Verkehr sollen folgende Potentiale aufzeigen: Der Vergleich von G und I soll das Potential der LZP mit LSAP aufzeigen, der Vergleich von I und J das der KZP, der Vergleich von J und K das der verbesserten Prädiktion durch Car2Car Kommunikation, der Vergleich von J und L das von PnG und der Vergleich von K und M das Potential von PnG mit verbesserter Prädiktion.

ID	LSA aktiv	Andere VT	KZP aktiv	LZP aktiv	LSAP aktiv	PnG Level	FZO	Variationen bzw. Parametereinstellungen
A	N	Ohne Verkehr	-	-	-	Lv10	-	$\alpha_{\text{stat}} \in \{0; 0,1 \dots 0,9; 1\}$
B	J		-	N	-	Lv10	-	$\alpha_{\text{stat}} \in \{0; 0,5\}$
C	J		-	J	N	Lv10	-	$\frac{v_{\text{min,LSA}}}{\text{km/h}} \in \{0; 50\}$
D	J		-	J	J	Lv10	-	$\frac{v_{\text{min,LSA}}}{\text{km/h}} \in \{30; 45; 50\}$
E	J		-	J	J	Lv8/Lv7	N	Lv8 und Lv7: $v_{\text{min,LSA}} = 28 \text{ km/h}$
F	J		-	J	J	Lv8/Lv7	J	Lv8 und Lv7: $v_{\text{min,LSA}} = 28 \text{ km/h}$
G	J	Mit Verkehr	N	N	N	Lv10	-	$\alpha_{\text{stat}} = 0,5$
I	J		N	J	J	Lv10	-	$\frac{v_{\text{min,LSA}}}{\text{km/h}} = 50$
J	J		J	J	J	Lv10	-	$\frac{v_{\text{min,LSA}}}{\text{km/h}} = 50$
K	J		J	J	J	Lv10	-	$\frac{v_{\text{min,LSA}}}{\text{km/h}} = 50$ und Car2Car mit drei VFs
L	J		J	J	J	Lv8	J	$v_{\text{min,LSA}} = 28 \text{ km/h}$
M	J		J	J	J	Lv8	J	$v_{\text{min,LSA}} = 28 \text{ km/h}$ und Car2Car mit drei VFs

Tab. 3-3: Parametervariationen: Die letzte Spalte zeigt, welche Variationen bzw. Parametereinstellungen gefahren werden; die anderen Spalten geben die Parameter an, die von einer Zeile zur nächsten verändert werden (J = Ja; N = Nein; „-“ = nicht relevant).

Die Simulationsergebnisse

³ Wenn $v_{\text{min,LSA}} \geq 30 \text{ km/h}$ wäre aufgrund von $v_A \geq v_{\text{min,LSA}}$ die Bedingung $v_A < v_{\text{stat,akt}}$ in der 30er-Zone nie erfüllt.

Zunächst wird die Route ohne LSA n und ohne Verkehr durchfahren und der Parameter α_{stat} , der den Segelanteil des Verzögerungsprofils vor statischen Geschwindigkeitsreduktionen beschreibt, variiert (Parametervariation A). Das Fahrzeug wird zum Routenende auf Kriechgeschwindigkeit (nicht zum Stillstand) gebracht, da als Abbruchkriterium der Simulation die Fahrstrecke dient und es schwierig ist, das exakte Streckenende mit der Geschwindigkeit 0 km/h zu erreichen.

Der relative Verbrauch wird definiert als Absolutverbrauch/Bezugsgröße, die Verbrauchserhöhung als Absolutverbrauch/Bezugsgröße – 1. Analoges gilt für die Fahrzeit.

Abbildung 3-16 zeigt, dass die Fahrzeit der energieeffizientesten Fahrweise ($\alpha_{\text{stat}} = 1$) verglichen mit der sportlichsten Fahrweise ($\alpha_{\text{stat}} = 0$) um fast 40 % verlängert wird und gleichzeitig Kraftstoffersparnisse von ca. 30 % erzielt werden. Da die Fahrzeiterhöhung von den meisten Kunden nicht akzeptiert wird, wird für nachfolgende Untersuchungen $\alpha_{\text{stat}} = 0,5$ verwendet – ein Kompromiss, der die Fahrzeit um ca. 10 % erhöht und dabei etwas mehr als 15 % Kraftstoff einspart. Es ist zu beachten, dass die Werte für die Fahrzeiterhöhung nur für den Fall ohne LSA n gelten. Bei aktivierten LSA n kann der Wert für Alpha zeitweise erhöht werden, ohne die Fahrzeit zu verändern.

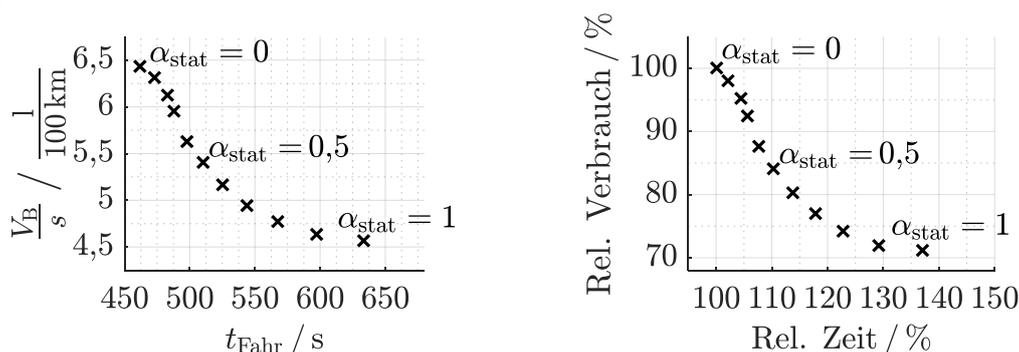


Abbildung 3-16: MHEV: Kraftstoffverbrauch pro Strecke und absolute Fahrzeit (links) und relativer Verbrauch und relative Fahrzeit (rechts) bei Variation von α_{stat} in Schritten von 0, 1. Die Route wird ohne LSA n und ohne Verkehr durchfahren.

Nun wird die Route mit aktivierten Schaltzeiten, aber weiterhin ohne Verkehr durchfahren.

Abbildung 3-17 stellt den Verbrauch der Parametervariationen B bis F bezogen auf die Rundkursfahrt B.1 mit deaktivierter LZP (LZPaus) und möglichst schneller Fahrweise ($\alpha_{\text{stat}} = 0$) dar. Die Referenzfahrt (B.1) absolviert den Rundkurs in 646,3 s mit einem Kraftstoffverbrauch von 7,117 l/100 km.

Zunächst fällt auf, dass bei aktivierter LZP (C bis F) – mit Ausnahme des PnG Betriebs ohne FZO (E.1 und E.2) – eine ähnliche, nur um einige Prozent höhere Fahrzeit erzielt wird. Der leichte Anstieg der Fahrzeit gegenüber der Referenzfahrt entsteht gegen Routenende, da das Fahrzeug bei aktivierter LZP mit einem CR-Verzögerungsprofil ($\alpha_{\text{stat}} = 0,5$) auf Kriechgeschwindigkeit gebracht wird (und nicht mit dem reinen Rekuperationsprofil von $\alpha_{\text{stat}} = 0$).

Bei deaktivierter LZP und der Einstellung $\alpha_{\text{stat}} = 0,5$ (B.2) erhöht sich die Fahrzeit um die Dauer der Rotphase der LSA, die aufgrund der dabei deaktivierten Alpha-adaption nicht bei Grün erreicht wird. Gleichzeitig wird der KSV mit dieser Einstellung um ca. 10 % reduziert. Die Aktivierung der LZP (C.1) führt zu weiteren Einsparungen von etwas weniger als zwei Prozent. Der Grund für diese geringe Verbesserung ist, dass beim Anfahren der LSA zwar Stillstände vermieden werden, die Geschwindigkeit jedoch in einigen Fällen so niedrig gewählt wird, dass die VKM bei geringen Wirkungsgraden betrieben wird. Ein zügigeres Anfahren mit nachfolgender Stillstandszeit ist verbrauchsgünstiger, was die Einstellung C.2 zeigt, die einen weiteren Prozent Kraftstoff spart. Bei dieser Einstellung ist die LSAP, die den Anhaltvorgang mit einem CR-Profil ($\alpha_{\text{stat}} = 0,5$) ausführt, noch nicht aktiv. Die LSAP (D.3) ermöglicht einen beträchtlichen Sprung um weitere 5,5 %. Die Aktivierung von PnG, Lv8-FZO (F.1), führt zu Einsparungen von weiteren 2,5 %. Die Einsparungen sind nicht größer, weil PnG nur etwa 10 % der Fahrzeit aktiv ist. Das ist auch der Grund, warum die Einsparungen von Lv7-FZO (F.2) nur 2 % unterhalb denen von Lv8-FZO liegen. Ohne FZO ist PnG häufiger aktiv und der Verbrauchsunterschied zwischen Lv8 und Lv7 ist größer (Vergleich von E.1 mit E.2). Allerdings wird beim PnG Betrieb ohne FZO nicht mehr gewährleistet, dass die voranliegende LSA möglichst zu Beginn der ausgewählten Grünphase erreicht wird. Die Fahrzeiterhöhung von PnG ohne FZO (E.1 und E.2) um mehr als 15 % liegt daran, dass eine LSA nicht mehr bei Grün erreicht wird, weil die vorherige LSA nicht früh genug überquert wurde.

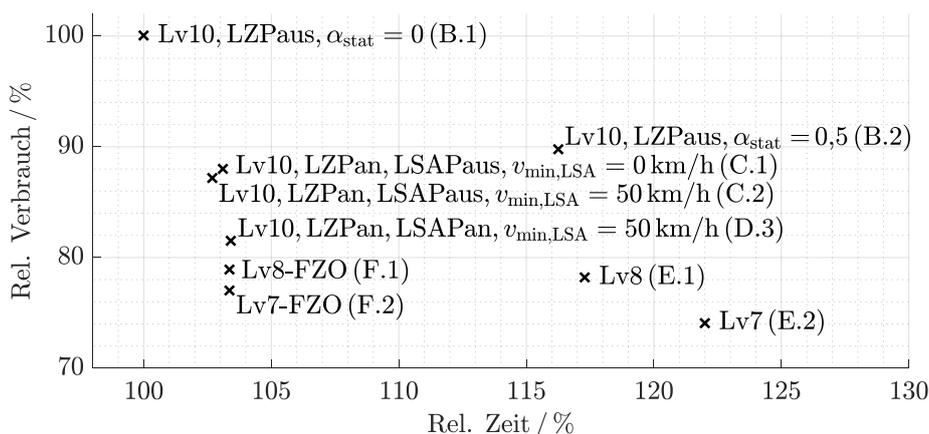


Abbildung 3-17: MHEV: Relativer Verbrauch und relative Fahrzeit bei Variation der Langzeitplanung (LZP an/aus), der Mindestgeschwindigkeit zum Anfahren der LSA, der LSA-Anfahrtsplanung (LSAP an/aus) und des Fahrkomfortlevels.

In Abbildung 3-17 wurde für $v_{\text{min,LSA}}$ der Wert 50 km/h verwendet (C.2 und D.3), da die VKM bei dieser Geschwindigkeit den geringsten KSV bei Konstantfahrt aufweist. Abbildung 3-18 bestätigt diese Wahl. Die Abbildung stellt den Verbrauch von C.1 ($v_{\text{min,LSA}} = 0$ km/h) und von der Parametervariation D bezogen auf den Verbrauch von B.1 dar und zeigt, dass beim Übergang von 45 km/h nach 50 km/h eine Sättigung eintritt (der Verbrauchsunterschied ist kleiner als 0,2 %).

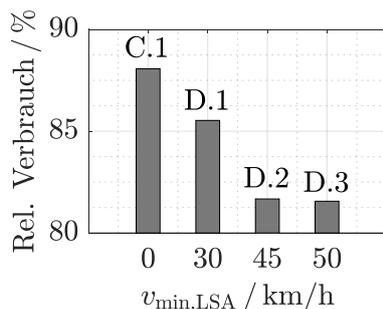


Abbildung 3-18: MHEV: Relativer Verbrauch als Funktion der Mindestgeschwindigkeit bei aktivierter LZP und LSAP.

Nun wird der Einfluss des Umgebungsverkehrs auf den KSV untersucht. Der Rundkurs wird vom Egofahrzeug für jede simulierte Parametereinstellung aus Tab. 3-3: Parametervariationen: Die letzte Spalte zeigt, welche Variationen bzw. Parametereinstellungen gefahren werden; die anderen Spalten geben die Parameter an, die von einer Zeile zur nächsten verändert werden (J = Ja; N = Nein; „-“ = nicht relevant). und jede Verkehrsdichte 20-mal durchfahren. Das Egofahrzeug startet wie bei den Simulationsdurchläufen ohne Verkehr beim Nullpunkt des Rundkurses und absolviert pro Simulationsdurchlauf eine vollständige Rundfahrt. Simuliert werden die Parametereinstellungen G bis M. Die VT werden vor jeder Rundfahrt mit zufälliger Position initialisiert. Die Anzahl an VT $N_{VT} \in \{25; 75; 150; 225; 300; 400\}$. Für die Verkehrsdichte gilt demnach bei einer Rundkurslänge von 5 863 m: $\rho_{\text{glob}} / (\text{VT}/\text{km}) \in \{4,3; 12,8; 25,6; 38,4; 51,2; 68,2\}$. Als Bezugswert zur Berechnung des relativen Verbrauchs dient der mittlere Verbrauch der Parametereinstellung G (mit $\alpha_{\text{stat}} = 0,5$), da diese eine ähnliche Fahrzeit wie die anderen Parametereinstellungen besitzt (siehe Abbildung 3-20, untere Grafik). Die Alphaadaption hat also bei Vorhandensein von Verkehr gegenüber der festen Einstellung $\alpha_{\text{stat}} = 0,5$ im betrachteten Zyklus nicht mehr den gleichen zeitlichen Vorteil wie im Fall ohne Verkehr (vgl. Abbildung 3-17). Der zeitliche Vorteil im Fall ohne Verkehr rührt daher, dass mit Alphaadaption gewisse Ampelphasen (im vorliegenden Zyklus genau eine) noch kurz vor dem Umschalten auf Rot erreicht werden. Dieser Vorteil entfällt zunehmend, wenn Vorderfahrzeuge das Erreichen der LSA bei grün verhindern.

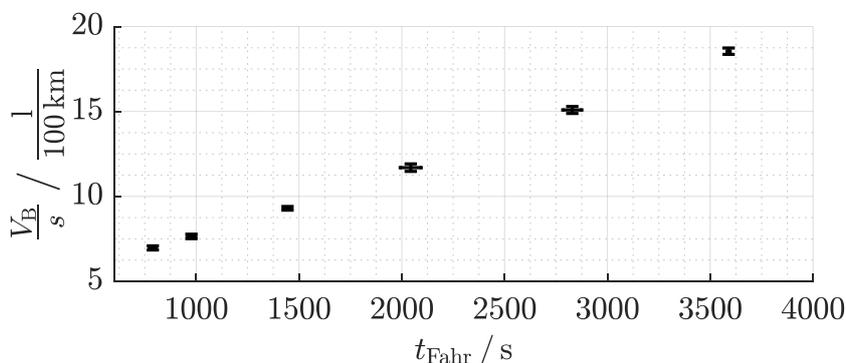


Abbildung 3-19: MHEV: Absoluter Verbrauch über Fahrzeit von der Referenzmessung ohne KZP und LZP (G) für $\rho_{\text{glob}} / (\text{VT}/\text{km}) \in \{4,3; 12,8; 25,6; 38,4; 51,2; 68,2\}$ (von links nach rechts).

Abbildung 3-19 stellt den absoluten Verbrauch der Referenzfahrt G über der Fahrzeit und Abbildung 3-20 (obere Grafik) die auf die Referenzfahrt bezogene Verbrauchserhöhung dar. Der absolute Verbrauch und die Fahrzeit steigen mit der Verkehrsdichte an. Die Simulationen werden nach 3600 s abgebrochen, weshalb die Fahrzeit der höchsten Verkehrsdichte bei 3600 s endet.

Im Folgenden werden die Mittelwerte der Verbrauchserhöhung betrachtet; die Standardabweichungen der unterschiedlichen Parametereinstellungen und Verkehrsdichten liegen bis auf wenige Ausnahmen zwischen 3 % und 3,5 % (siehe Abbildung 3-20 obere Grafik). Da sich die Verbrauchserhöhung nicht mehr wie in Abbildung 3-17 auf die Einstellung $\alpha_{\text{stat}} = 0$ sondern auf $\alpha_{\text{stat}} = 0,5$ bezieht, entfällt der Sprung von etwas mehr als 10 %, der sich beim Übergang von $\alpha_{\text{stat}} = 0$ zu $\alpha_{\text{stat}} = 0,5$ in Abbildung 3-17 ergibt. Bei der niedrigsten Dichte von 4,3 VT/km führt die Aktivierung der LZP mit LSAP (I) zu mittleren Ersparnissen von 10,8 %, die mit steigender Dichte stetig bis auf ca. 1 % abnehmen. Die Aktivierung der KZP ohne Car2Car Kommunikation mit konstanter Geschwindigkeitsprädiktion (J) verbessert den KSV bei niedrigen Fahrzeugdichten (4,3 VT/km und 12,8 VT/km) geringfügig um max. 1 % und führt bei höheren Fahrzeugdichten tendenziell zu leichten Verschlechterungen, dem aber durch die Aktivierung der Car2Car Kommunikation und verbesserten Prädiktion (K) entgegengewirkt werden kann. Ohne die Verfügbarkeit von Car2Car Kommunikation sollte deshalb in der Praxis die vorausschauende Verzögerungsfunktion bei Folgefahrten deaktiviert und nur für Annäherungsvorgänge verwendet werden, bei denen der Abstand zu einem langsamer fahrenden VF deutlich größer als der Zielabstand ist, da sich Fehlprädiktionen in diesem Fall weniger stark auswirken. Die höchsten Einsparungen bei aktivierter KZP (K) verglichen mit der Einstellung ohne KZP (I) betragen 1,5 % (bei der Dichte 12,8 VT/km). Da die KZP mit konstanter Geschwindigkeitsprädiktion (J) zu Verschlechterungen führen kann, werden die Ersparnisse bei Aktivierung von PnG (L und M) im Folgenden mit dem Maximum der Ersparnisse von I und J verglichen. Die Aktivierung von PnG (L) führt bis zu einer Fahrzeugdichte von 38,4 VT/km zu zusätzlichen Ersparnissen von 1,6 % bis 3,5 %; in Verbindung mit der verbesserten Prädiktion (M) liegen diese zwischen 2,7 % und 4 %. Die zusätzlichen Einsparungen durch PnG können mit Verkehr folglich größer sein als im Fall ohne Verkehr, für den sie 2,5 % betragen (vgl. Abbildung 3-17). Der Verkehr führt dazu, dass die LZP in einigen Fällen eine spätere Grünphase als Zielgrünphase auswählt, wodurch die Sollgeschwindigkeit verringert und der PnG Betrieb insgesamt länger aktiv ist.

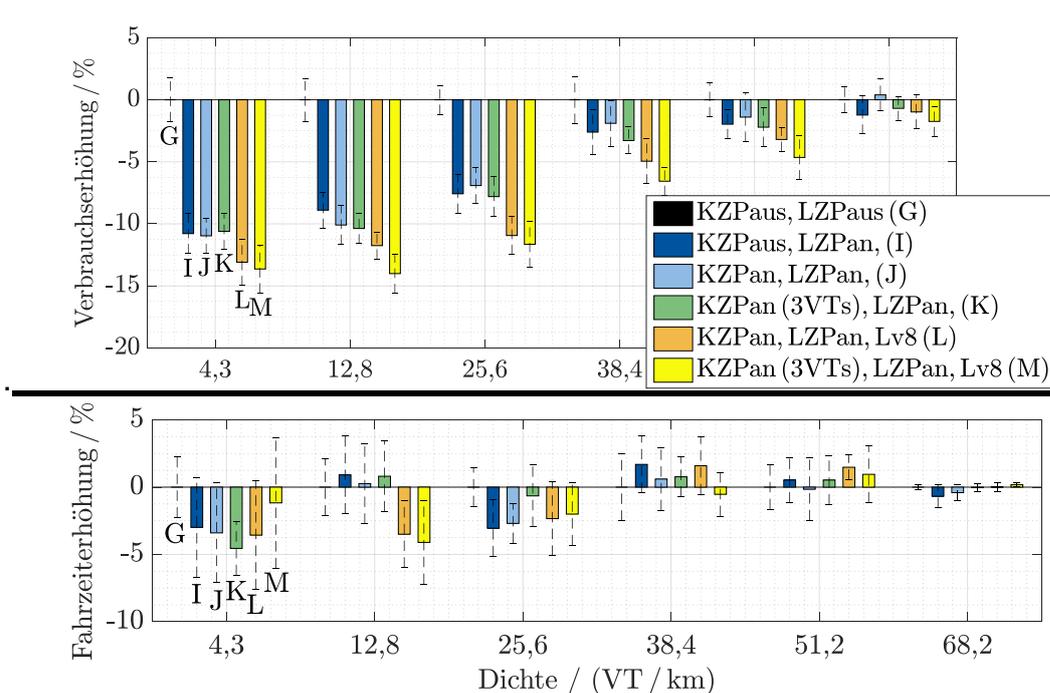


Abbildung 3-20: MHEV: Verbrauchserhöhung (oben) und der Fahrzeiterhöhung (unten) bei Variation der Verkehrsdichte (Mittelwerte und Standardabweichung).

3.2.2 Simulationsstudie für ein batterieelektrisches Fahrzeug: Reduktion des Energiebedarfs durch vorausschauende Geschwindigkeitwahl

Motivation

Rein elektrisch angetriebene Kraftfahrzeuge stellen eine lokal emissionsfreie Mobilitätsform dar und tragen somit zur Reduktion der Schadstoffbelastung in städtischen Ballungsgebieten bei. Darüber hinaus kann durch die Nutzung von regenerativ gewonnenem Strom ein Beitrag zur Minderung des globalen CO₂-Ausstoßes sowie des anthropogenen Treibhauseffekts geleistet werden. Trotz der bereits guten Voraussetzungen dieser Antriebsart ist für eine nachhaltige Nutzung die Minimierung der erforderlichen Antriebsenergie von großer Bedeutung, da die dazu eingesetzte elektrische Energie aktuell noch immer zu einem großen Teil aus fossilen Energieträgern gewonnen wird. Des Weiteren bestimmt die erforderliche Antriebsenergie maßgeblich die Reichweite von Elektrofahrzeugen. So kann durch einen reduzierten Energiebedarf entweder bei gleicher Batteriegröße die Reichweite erhöht werden (steigert die Nutzerakzeptanz) oder bei gleicher Reichweite der maximale Energieinhalt der Batterie reduziert werden. Dies wiederum führt dazu, dass die Kosten für batterieelektrische Fahrzeuge gesenkt werden (erhöht die Nutzerakzeptanz) und weniger knappe Ressourcen (z.B. Kobalt) für die Batterieherstellung benötigt werden.

Ziel

Mit dieser Motivation als Grundlage verfolgt die in diesem Projekt durchgeführte und nachfolgend vorgestellte Simulationsstudie das Ziel das Energieeinsparpotenzial für Elektrofahrzeuge zu quantifizieren, das durch die automatisierte Umsetzung energieeffizienter Fahrzeuglängsführung unter Nutzung von Technologien zur Fahrzeugvernetzung wie dem OCT der VEMAC entsteht.

Lösungsansatz

Für eine energieeffiziente Fahrweise sollte die Geschwindigkeit grundsätzlich so gewählt werden, dass bereits aufgewendete kinetische Energie möglichst lange erhalten bleibt, ohne durch unnötige Bremsvorgänge dissipiert zu werden. Damit diese Maxime sicher und den Verkehrsregeln entsprechend umgesetzt werden kann, ist eine umfassende Kenntnis der aktuellen Verkehrssituation (u.a. Position der Verkehrsteilnehmer, Verkehrsschilder, ggf. vorhandene Lichtsignale) sowie eine zuverlässige Prognose über die zukünftige Entwicklung erforderlich. Mithilfe mathematischer Optimierungsverfahren, die diese Prognose implizit oder explizit als Randbedingung berücksichtigen, können Situationen noch vor ihrem Eintreten antizipiert und bei der vorausschauenden Geschwindigkeitswahl berücksichtigt werden. So kann der durch die Fahrzeugvernetzung ermöglichte Informationsvorteil gegenüber menschlichen Fahrern in deutliche Energieeinsparungen überführt werden.

Daher wird in diesem Projekt ein Algorithmus (siehe fetter schwarzer Kasten in Abbildung 3-21) entwickelt, der Daten aus der Fahrzeugvernetzung gewonnenen Daten aufbereitet und eine Prognose über das zukünftige das Verkehrsgeschehen im direkten Fahrzeugumfeld des zu optimierenden Fahrzeugs erstellt, um darauf basierend für eine nachgeschaltete Optimierung einen validen Lösungsraum aufzubauen. Für die Optimierung wird auf eine modellprädiktive Regelung zurückgegriffen. Die entwickelten Algorithmen und Funktionen werden in eine Simulationsumgebung bestehend aus einer Co-Simulation aus Verkehrssimulation (SUMO - Simulation of Urban MObility) und Fahrzeugsimulation (Automotive Simulation Models der Firma dSPACE) integriert, um das Energieeinsparpotenzial zu quantifizieren.

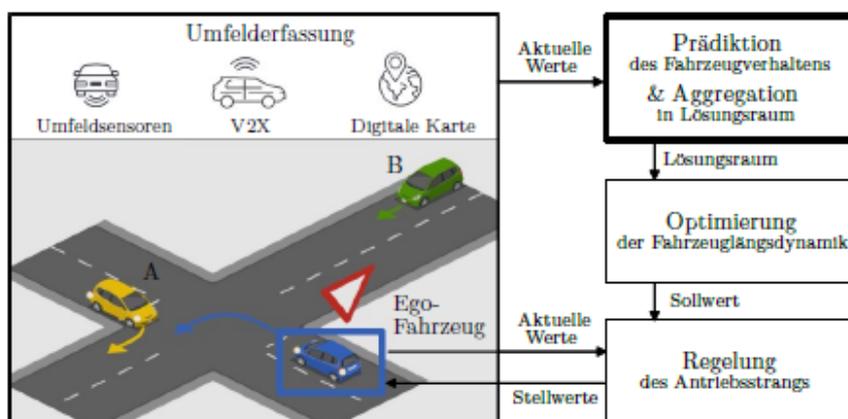


Abbildung 3-21: Übersicht des Gesamtkonzepts der entwickelten Funktionen

Umfelderfassung durch Fahrzeugvernetzung

Mit dem Begriff der Vernetzung wird in diesem Kontext die Fähigkeit von Fahrzeugen zusammengefasst, mit ihrer Umgebung (V2X) zu kommunizieren. Dies kann die Kommunikation der Fahrzeuge untereinander (V2V), mit der Verkehrsinfrastruktur (V2I) sowie die Kommunikation mit Cloud- Diensten (V2C) meinen. Bei der V2V-Kommunikation können so beispielsweise aktuelle Fahrzeugzustandsinformationen wie Position und Geschwindigkeit oder Gefahrenhinweise mit anderen Fahrzeugen in direkter Umgebung ausgetauscht werden. Lichtsignalanlagen (LSA) können den

Verkehrsteilnehmern als Beispiel für die V2I-Kommunikation ihre aktuelle Lichtsignalphase und die Dauer bis zum nächsten Lichtsignalwechsel bereitstellen. Aus der V2C-Kommunikation können etwa aktuelle Straßen- oder Wetterdaten bezogen werden. Im Vergleich zur fahrzeugeigenen Sensorik kann somit durch die Fahrzeugvernetzung die Umgebungswahrnehmung deutlich verbessert werden, da sowohl der räumliche Erfassungsbereich erweitert als auch zusätzliche, für das automatisierte Fahren unerlässliche Informationen berücksichtigt werden können.

Prädiktionsalgorithmus

In dem entwickelten Prädiktionsalgorithmus werden die Daten aus der Fahrzeugvernetzung so aufbereitet, dass mit einer speziellen Logik zur Berücksichtigung der Verkehrsregeln in Kombination mit einem Fahrer-Fahrzeugmodell das Verhalten relevanter Fahrzeuge in der Fahrzeugumgebung in die Zukunft prädiziert werden kann. Daraus wird dann ein Lösungsraum (Weg-Zeit und Geschwindigkeit-Zeit) für die energetische Optimierung abgeleitet.

Für die Datenvorbereitung werden zunächst aus den Kartendaten die nächste Kreuzung bestimmt und die relevanten Größen (z.B. Anzahl der Straßen und Spuren inkl. möglicher Abbiegeoptionen, max. erlaubte und durchschnittliche Geschwindigkeiten, Straßen- und Kreuzungsgeometrie, Vorfahrtsregel, LSA-ID) extrahiert. Die Fahrzeuginformationen aus der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation werden auf Plausibilität überprüft. Anhand der per V2X übertragenen Blinkerinformationen wird die Abbiegerichtung bestimmt. Es erfolgt eine Zuordnung zu den in der Karte enthaltenen Straßen und Spuren. Es werden Abstände zu Vorderfahrzeugen und zum Kreuzungsbeginn bestimmt. Die Fahrzeuge werden entsprechend ihrer Relevanz für das Manöver des zu optimierenden Fahrzeugs eingestuft. Das beinhaltet eine Klassifizierung, ob das Fahrzeug vorausfahrend oder kreuzend ist. Zusätzlich wird die Reihenfolge der Fahrzeuge in den Fahrspuren bestimmt. Die Ampel bezogenen V2X-Daten werden ebenfalls den Karteninformationen zugeordnet.

Die Datenprädiktion umfasst die Prädiktion des Ampelzustands (Signalphase) sowie die des Fahrzeugzustands (Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung). Für die Prädiktion des Fahrzeugverhaltens wird ein Fahrzeugmodell verwendet, das auf dem Intelligent Driver Modell basiert [1]. Die kontinuierliche Modellgleichung für die Fahrzeugbeschleunigung \dot{v} lautet:

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

mit

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left(0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right)$$

Hierbei stellt a die max. Fahrzeugbeschleunigung, b die komfortable Verzögerung, v die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit, v_0 die Zielgeschwindigkeit, s den aktuellen Abstand zum Vorderfahrzeug und s_0 den dynamischen Zielabstand dar. Um die Fahrzeuggeschwindigkeit v und den zurückgelegten Weg s zu erhalten, wird \dot{v} einmal

bzw. zweimal nach dt integriert. Aus den geschätzten, zukünftigen Bewegungsverläufen der relevanten Fahrzeuge werden die Weg- und Geschwindigkeitsbegrenzungen für das zu optimierende Fahrzeug hergeleitet.

Für die Geschwindigkeit sind mögliche Begrenzungsursachen in der linken Hälfte der Abbildung 3-22 entlang einer fiktiven Route visualisiert. Hierbei ist die gesetzlich zulässige Höchstgeschwindigkeit $v_{\max,G}$ (im Beispiel: zunächst 50 km/h, dann 30 km/h) maßgebend. Darüber hinaus kann es aus Sicherheits- und Komfortgründen erforderlich sein, die Höchstgeschwindigkeit aufgrund scharfer Kurven $v_{\max,K}$, Gefahrenstellen oder bei der Anfahrt auf eine Kreuzung $v_{\max,A}$ über die gesetzlichen Grenzen hinaus zu reduzieren. Mindestgeschwindigkeiten sind typischerweise nicht zu beachten. Die Begrenzungen für die Geschwindigkeitswahl sind, mit Ausnahme der meist auf Autobahnen vorzufindenden dynamischen Geschwindigkeitsreglung, zeitlich invariant und ortsfest. Somit sind diese Werte prinzipiell für eine definierte Route vorab bestimmbar. Da die Optimierung jedoch zeitgeführte Randbedingungen erwartet, ist eine Transformation der ortsabhängigen Geschwindigkeitsbegrenzungen in den Zeitbereich erforderlich.

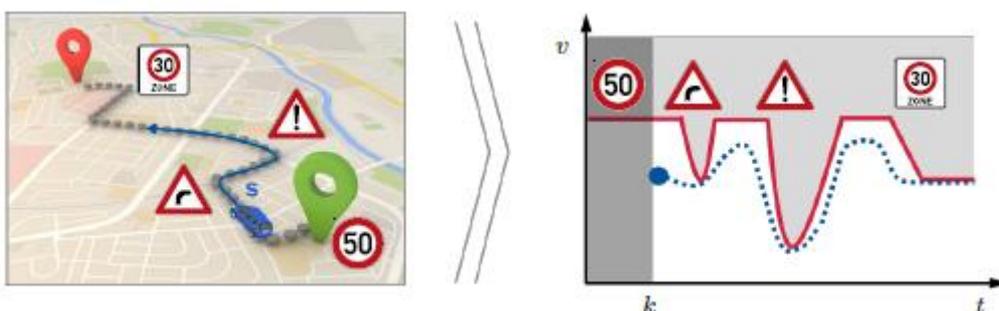


Abbildung 3-22: Schematische Darstellung eines Geschwindigkeit-Zeit-Lösungsraums (grauer Bereich: nicht zulässig, blauer Punkt: aktuelle Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs, blaue Linie: optimaler Geschwindigkeitsverlauf zum aktuellen Zeitpunkt t_0) für eine beispielhafte Route mit ortsfesten Geschwindigkeitsgrenzen

Die Begrenzung der Fahrzeugposition garantiert die Verkehrssicherheit in Situationen mit LSA, kreuzenden sowie vorausfahrenden Fahrzeugen. An LSA muss bei Rotlicht die Fahrzeugposition auf die Haltelinie begrenzt werden, so dass diese nicht überfahren wird. Am Ende einer Grünphase muss sich dann das Fahrzeug bereits hinter der Kreuzung befinden. Um dies sicherzustellen, wird ab diesem Zeitpunkt der Minimalwert der Fahrzeugposition auf das Kreuzungsende angehoben. Falls sich mehrere Grünphasen im Prädiktionshorizont befinden, ist aufgrund der Konvexitätsbedingung für die Optimierung nur eine einzige Grünphase als Zielvorgabe auszuwählen. Kreuzender Verkehr kann aus Perspektive des Ego-Fahrzeugs wie eine virtuelle Lichtsignalanlage (vLSA) betrachtet werden. Solange sich vorfahrtsberechtigzte Fahrzeuge im relevanten Kreuzungsbereich befinden, darf der Kreuzungsbereich analog zur Rotlichtphase einer physikalischen LSA nicht befahren werden. Dazu ist jedoch eine Vorhersage des Verhaltens der jeweiligen Fahrzeuge auf der Kreuzung erforderlich, um Start und Ende der virtuellen Rotphase zu bestimmen. Für die Begrenzung der Fahrzeugposition aufgrund kreuzender Fahrzeuge gelten dann die gleichen Grundsätze wie für die Positionsbeschränkung aufgrund physikalischer LSA. Vorausfahrende Fahrzeuge weisen im Vergleich zu den bisher vorgestellten,

ortsfixen und zeitvariablen Randbedingungen in beiden Dimensionen Variabilität auf, da sich Fahrzeuge im Allgemeinen im Laufe der Zeit entlang ihrer Route fortbewegen. Im Fall vorausfahrender Fahrzeuge muss also die Begrenzung der Fahrzeugposition unter Beachtung der voraussichtlichen Bewegungsverläufe des Vorderfahrzeugs und eines geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstands adaptiert werden. Zur Aggregation aller Einzelbegrenzungen der Fahrzeugposition werden die Maximal- bzw. Minimalwerte zu jedem Zeitschritt im Prädiktionshorizont bestimmt, je nachdem ob sich um eine obere oder untere Restriktion handelt. Ein entsprechender Lösungsraum ist für eine beispielhafte Kreuzungssituation in Abbildung 3-23 dargestellt.

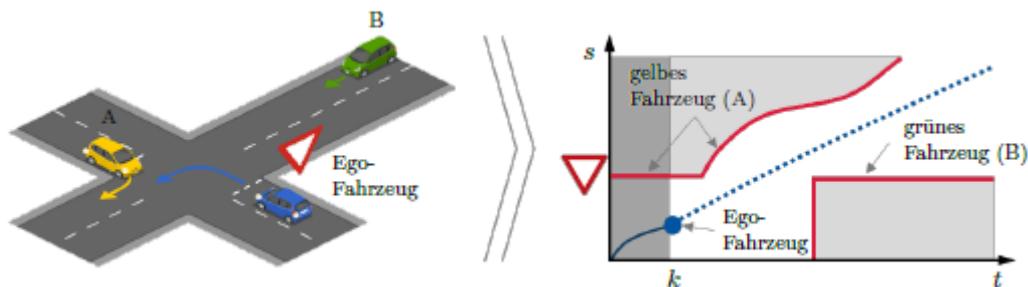


Abbildung 3-23: Schematische Darstellung eines Weg-Zeit-Lösungsraums für eine Beispielkreuzungssituation, Abbildung wurde teilweise mithilfe von icograms erstellt (<https://icograms.com>)

Energetische Optimierung mittels Modellprädiktiver Regelung (MPR)

Das übergeordnete Ziel des verwendeten prädiktiven Regelalgorithmus besteht in der Minimierung des Gesamtenergiebedarfs für den Fahrzeugvortrieb durch Reduzierung unnötiger Beschleunigungs- und Verzögerungsmanöver. Es wird die Annahme zugrunde gelegt, dass der Beschleunigungswiderstand in urbanen Verkehrssituationen die dominierende Größe für den Gesamtenergiebedarf darstellt. So wird unabhängig von der Antriebsart die erforderliche Antriebsleistung am Rad minimiert und in Folge dessen ebenfalls der antriebsartspezifische chemische bzw. elektrische Energiebedarf verringert. Der Einfluss eines solchen Ansatzes auf das Energieeinsparpotenzial verschiedener Antriebsarten wurde bereits in [2] näher untersucht. Es wurde gezeigt, dass ein Plug-In Hybrid Fahrzeug am stärksten von einem optimierten Geschwindigkeitsverlauf profitiert (bis zu 45% geringerer äquivalenter Kraftstoffverbrauch), gefolgt von einem batterieelektrischen Fahrzeug (bis zu 44% geringerer elektrischer Energiebedarf) und einem mit Verbrennungsmotor angetriebenen Fahrzeug (bis zu 35% geringerer Kraftstoffverbrauch). Das der MPR zu Grunde liegende Prinzip wird im Folgenden zunächst kurz in allgemeiner Form erläutert und dann bezogen auf die Problemstellung konkretisiert. Für weitergehende Informationen sei auf die einschlägige Fachliteratur hingewiesen (z.B. [3])

Die MPR profitiert bei der Regelung eines steuerbaren und beobachtbaren Prozesses von der Nutzung eines internen Modells zur Vorhersage des zukünftigen Prozessverhaltens. Somit kann das Antwortverhalten des Prozesses auf zukünftige Stellgrößeneingriffe bei der Findung einer optimalen Stellgrößenfolge im Voraus berücksichtigt werden. Hierzu wird die Differenz zwischen dem geforderten Sollverlauf oder optional, für nicht sprungfähige Prozesse, zwischen einer aus dem

Sollwertverlauf berechneten Referenztrajektorie und dem prädizierten Prozessverhalten innerhalb eines bestimmten Zeitfensters – dem sogenannten Prädiktionshorizont N_p – unter Berücksichtigung von Randbedingungen minimiert. Zur Reduktion der Komplexität kann die Annahmen getroffen werden, dass die Stellgröße ab einem gewissen Zeitpunkt N_c (Stellhorizont) nicht mehr verändert wird. Für die Prädiktion späterer Zeitpunkte wird dann die letzte Stellgröße beibehalten.

Für die eingesetzte Klasse von Optimierungsproblemen mit quadratischer Kostenfunktion und linearen Randbedingungen existiert eine Vielzahl an effizienten numerischen Lösungsverfahren. Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Minimierung der Kostenfunktion auf die Active-Set-Methode zurückgegriffen, die mit dem bereits in der Model Predictive Control Toolbox von MATLAB/Simulink verfügbaren KWIK Algorithmus nach [4] umgesetzt wird. Dabei wird die maximale Anzahl an Iterationen auf 1600 begrenzt und der Toleranzwert zur Überprüfung der Randbedingungen auf 0,0001 gesetzt.

Die Randbedingungen des Optimierungsproblems bilden einen wichtigen Beitrag zur Verkehrssicherheit und Energieeffizienz. Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Prädiktionsalgorithmus hat daher das Ziel, die erforderlichen Randbedingungen über den Prädiktionshorizont N_p möglichst genau zu prognostizieren.

Energieeinsparpotenzial

Zur Bewertung des Energieeinsparpotenzials (Antriebsenergie am Rad) der entwickelten Funktion (Prädiktion und Geschwindigkeitsoptimierung) wird eine Simulationsstudie durchgeführt. Dazu werden die entwickelten Algorithmen in ein Fahrzeugmodell in die Simulationsumgebung Automotive Simulation Models der Firma dSPACE integriert und mit öffentlich verfügbaren Parametern des aktuellen Modells des Elektrofahrzeugs BMW i3 parametrisiert. Zur adäquaten Berücksichtigung von Verkehr wird die Fahrzeugsimulation mit der Verkehrssimulation SUMO (Open Source) gekoppelt. Als Versuchsstrecke wird das Aldenhoven Testing Center geometriegetreu nachgebildet um zukünftig eine Validierung mit realen Daten durchführen zu können. Auf dem modellierten Testgelände befinden sich eine Vielzahl miteinander verbundener Kreuzungen mit unterschiedlichen Verkehrsbedingungen (Ampeln, Rechts-vor-Links, Stopp, Vorfahrtachten, Kreisverkehr). Zur Bewertung des Energieeinsparpotenzials wird der spezifische Energiebedarf von insgesamt 30 Fahrzeugen mit dem spezifischen Energiebedarf des optimierten Fahrzeugs verglichen. Das Ergebnis ist in Abbildung 3-24 in Form eines Histogramms dargestellt. Im arithmetischen Mittel kann die vorausschauende Fahrtstrategie einen Energievorteil von 15% aufweisen. Maximal kann die Antriebsenergie um 35% reduziert werden.

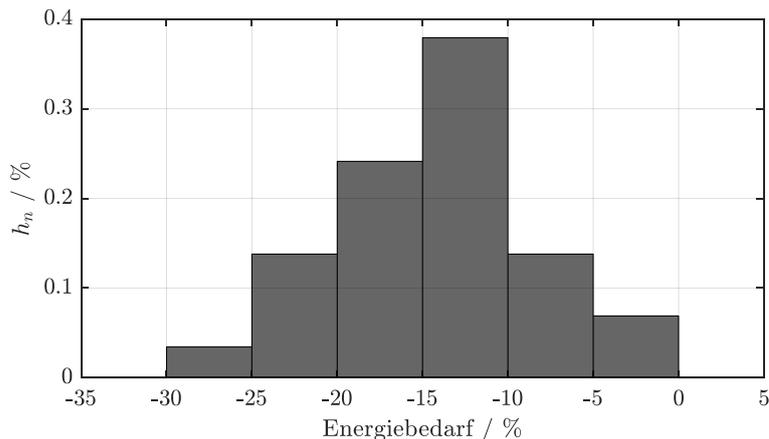


Abbildung 3-24: Energiebedarf der optimierten Fahrstrategie im Vergleich zu 30 Referenzfahrzeugen (neg.: Energieeinsparung, pos.: Energiemehrbedarf)

Unter der Annahme eines annähernd konstanten Antriebsstrangwirkungsgrads können Einsparungen in ähnlicher Größenordnung auf Batterieebene erwartet werden. Zusammenfassend kann somit gezeigt werden, dass Werkzeuge zur Fahrzeugvernetzung (z.B. das OCT) in Kombination mit den hier entwickelten Algorithmen ein enormes Potenzial aufweisen, den Energiebedarf von Elektrofahrzeugen zu reduzieren. In Folge dessen können die Herstellungskosten der Fahrzeuge aufgrund der kleiner zu dimensionierenden Batterien reduziert oder die Reichweite gesteigert werden. Beides führt zur Steigerung der Attraktivität und zu einer schnelleren und größeren Marktdurchdringung der lokal emissionsfreien Mobilitätsform Elektrofahrzeug.

3.2.3 Simulationsstudie für ein Plug-In Hybrid-Fahrzeug: Optimiertes Energiemanagement durch Einbezug vorausschauender Verkehrsinformationen

Einleitung

Die heutigen Verbrennungsmotoren sind in ihrer Entwicklung bereits nahe an ihren besten realisierbaren Wirkungsgraden angelangt. Um die geforderten CO₂-Emissionsgrenzwerte einzuhalten, sind alternative Antriebssysteme notwendig. Auch wenn vollelektrische Fahrzeuge mittlerweile Realität sind, ist die Reichweitenangst immer noch ein großes Problem für die Akzeptanz bei den Verbrauchern. In diesem Zusammenhang haben Hybrid-Elektrofahrzeuge (HEV) das Potenzial, im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen einen niedrigen Kraftstoffverbrauch und niedrige Emissionen zu erreichen und haben nicht das Problem der Reichweitenangst wie vollelektrische Fahrzeuge.

HEV bestehen aus mindestens zwei verschiedenen Energiequellen und zwei verschiedenen Energiewandlern. Die in einer Batterie gespeicherte elektrische Energie ist eine der beiden Quellen. Die andere Quelle ist die chemische Energie des Kraftstoffs, die durch einen Verbrennungsmotor oder eine Brennstoffzelle umgewandelt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Diesel-HEV verwendet. Da die Energie beim Bremsen zurückgewonnen werden kann, ergibt sich bei HEVs ein geringerer äquiva-

lenter Kraftstoffverbrauch. Zusätzlich kann der geringe Teillastwirkungsgrad des Verbrennungsmotors durch E-Antrieb oder Lastpunktverschiebung des Motors in einen hohen Wirkungsgradbereich überdeckt werden. Um die oben genannten Vorteile eines HEV nutzen zu können, ist eine Energiemanagement-Steuerung erforderlich, die den gewünschten Hybridmodus wählt und das Drehmoment zwischen Verbrennungsmotor und E-Maschine für eine bestimmte Pedalstellung aufteilt. Die Energiemanagementstrategie (EMS) hat einen großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen eines HEV.

Die EMS-Strategien lassen sich grob in regelbasierte und optimierungsbasierte Strategien einteilen. Regelbasierte Strategien sind eine Reihe von Regeln, die auf der Grundlage der Systemkenntnis oder unter Verwendung experimenteller Daten entwickelt wurden. Die Leistung von regelbasierten Reglern kann durch Feinabstimmung erhöht werden, was eine langwierige Aufgabe ist und zudem nicht optimal ist. Die modellprädiktive Regelung (MPR) ist ein optimierungsbasierter Ansatz für das EMS. Das Verhalten des Systems wird durch die Kombination von Zustandsgrößen und Steuereingängen modelliert. Es wird ein optimales Regelungsproblem (OCP) formuliert, das online unter Verwendung der Vorhersage der zukünftigen Zustände in einem Schema mit reduziertem Horizont gelöst wird. Die Möglichkeit, mehrere Nebenbedingungen explizit zu behandeln, macht es populär. Der Großteil der Literatur basiert auf linearer MPR, da sie rechnerisch weniger aufwändig und in Echtzeitanwendungen leicht zu implementieren ist. Allerdings können lineare Modelle die Dynamik eines HEV-Antriebsstrangs nicht vollständig berücksichtigen. Die Leistung der MPR hängt stark von der Genauigkeit des Vorhersagemodells ab. Daher wird in dieser Arbeit ein nichtlinearer modellprädiktiver Regler (NMPR) für den Energiemanagement vorgeschlagen und entwickelt. Der NMPR wird unter Verwendung eines Echtzeit-Iterationsschemas realisiert, was ihn recheneffizient und daher in Echtzeit implementierbar macht.

Demonstrator

Als Entwicklungs- und Testplattform wurde ein Diesel-Plug-in-Hybrid-Demonstratorfahrzeug mit einer P02-Topologie aufgebaut, wie in Abbildung 3-25 dargestellt. Das Basisfahrzeug ist ein VW Crafter mit konventionellem Hinterradantrieb. Die P02-Parallelhybrid-Topologie wurde aufgrund ihrer hohen Flexibilität zur Emulation verschiedener Hybrid-Betriebsmodi und ihrer Kompatibilität mit einem sehr hohen Anteil an Großserienkomponenten ausgewählt. Die Auslegung der Batterie und der elektrischen Maschinen wurde auf der Grundlage der Verfügbarkeit der Komponenten auf dem Markt gewählt.

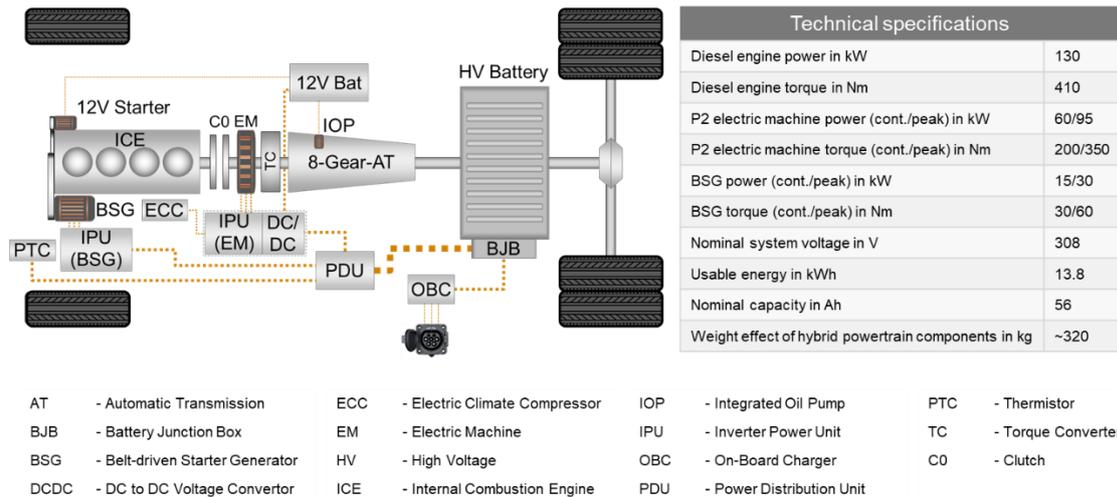


Abbildung 3-25: Antriebsstrang-Layout und technische Spezifikationen des Hybrid-Demonstratorfahrzeugs

Simulationsumgebung

Ein High-Fidelity-Modell des oben genannten Demonstratorfahrzeugs wurde mit der FEV-Mittelwert-Simulations-Toolchain aufgebaut. Die Toolchain ist eine Simulink-basierte virtuelle Test- und Anwendungsumgebung für die Simulation von Antriebsstrangkonzepthen in Längsrichtung des Fahrzeugs. Die Simulations-Toolchain beinhaltet ein physikalisches Mittelwert-Motormodell, detaillierte Abgasnachbehandlungsmodelle, Getriebe- und Hybridkomponentenmodelle einschließlich vereinfachter Modelle der relevanten Antriebsstrangsteuergeräte. Das Modell ist modular aufgebaut und ermöglicht so die Simulation unterschiedlicher Hybridtopologien, Zyklen und Betriebsstrategien.

Nichtlineare modellprädiktive Regelung

Für die Verwendung des modellprädiktiven Reglers wird jedoch ein einfaches, aber dennoch ausreichend komplexes regelungstechnisches Modell betrachtet. Der Motor und die elektrische Maschine P2 befinden sich auf einer einzigen Welle und daher ist die Motordrehzahl gleich der Drehzahl der elektrischen Maschine, wenn die Kupplung zwischen Motor und elektrischer Maschine geschlossen ist. Die Kupplungen werden als ideal angenommen. Die Modellierung des Wechselrichters und der anderen Leistungselektronik wird hier ignoriert, da angenommen wird, dass sie einen sehr hohen Wirkungsgrad haben und sie nicht im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen. In dieser Arbeit wird nur die P2-Hybridtopologie betrachtet, wie in Abbildung 3-26 dargestellt. Die regelungstechnischen Modelle für den Verbrennungsmotor, die Batterie und das Fahrzeug werden in den folgenden Unterkapiteln betrachtet.

Fahrzeug

Die Längsdynamik des Fahrzeugs wird für die Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit wie folgt berücksichtigt,

$$\dot{v}_{Ego}(t) = \left(\left((T_{Eng} + T_{Mot}) i_{Gb} i_D + T_{Brk} \right) / r_{Dyn} - (F_0 + F_1 v_{Ego} + F_2 v_{Ego}^2) \right) / m_{Ego}$$

wobei m_{Ego} die Masse des Fahrzeugs, a_{Ego} und v_{Ego} die Beschleunigung bzw. die Geschwindigkeit des Fahrzeugs, T_{Eng} das vom Motor abgegebene Bremsmoment, T_{Mot} das von der elektrischen Maschine abgegebene mechanische Drehmoment, i_{Gb} die Getriebeübersetzung, i_D die Differentialübersetzung, T_{Brk} das von den Reibungsbremsen bereitgestellte Drehmoment, r_{Dyn} der Radradius, F_0 , F_1 und F_2 Nachlaufparameter zur Modellierung der Widerstandskräfte am Fahrzeug sind. Die Straßenneigung wird vernachlässigt, sofern nicht anders angegeben.

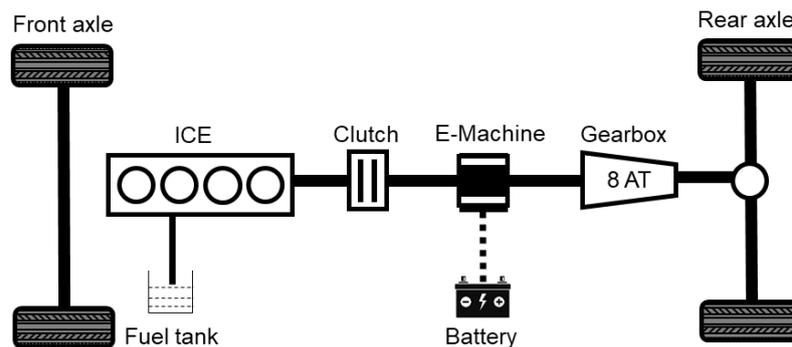


Abbildung 3-26: Schematische Darstellung des in den Simulationen berücksichtigten Antriebsstrangmodells

Verbrennungsmotor

Die Verlustleistung wird zur Modellierung des Kraftstoffverbrauchs des Verbrennungsmotors verwendet. Zu diesem Zweck werden stationäre Prüfstandsdaten verwendet, um den Wirkungsgrad für verschiedene Betriebspunkte zu berechnen, wie in Abbildung 3-27 dargestellt. Eine Polynomfunktion dritter Ordnung wird verwendet, um diese Verlustleistung als Funktion der Drehzahl und des Drehmoments im gewünschten Betriebspunkt darzustellen. Der Kraftstoffmassendurchsatz kann durch die Summe aus der erforderlichen Leistung und der geschätzten Verlustleistung wie folgt berechnet werden

$$\dot{m}_{Fu} = (\omega_{Eng} T_{Eng} + P_{Eng,loss}) / H_u$$

wobei \dot{m}_{Fu} der Massendurchsatz, ω_{Eng} die Drehzahl des Motors, $P_{Eng,loss}$ die Verlustleistung und H_u der Heizwert von Diesel ist. Die Verlustleistung wird anhand von experimentellen Daten modelliert, die vom Prüfstand eines Demonstrationsfahrzeugs stammen. Die Methode der kleinsten Quadrate wird zur Approximation eines Polynoms an die experimentellen Daten verwendet.

$$P_{Eng,loss} = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^3 a_{ij} \omega_{Eng}^i T_{Eng}^j$$

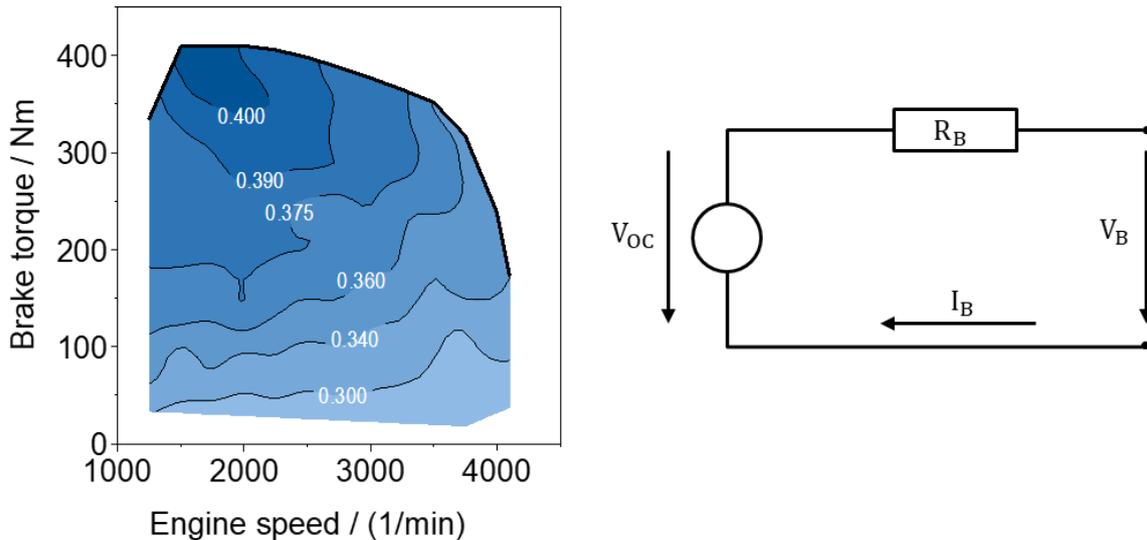


Abbildung 3-27: Steady-State-Wirkungsgradkennfeld des Dieselmotors (links) und Innenwiderstandsmodell der Batterie (rechts)

Elektrische Maschine

Ähnlich wie beim Verbrennungsmotor werden die Leistungsverluste der elektrischen Maschine über eine Polynomfunktion von Drehzahl und Drehmoment modelliert. Da die Schwankung des Wirkungsgrades der elektrischen Maschine in den am häufigsten verwendeten Betriebspunkten nicht so groß ist, wird ein konstanter Wirkungsgrad von 90% angenommen, um den Rechenaufwand während des Optimierungsprozesses zu reduzieren. Es wird auch angenommen, dass die elektrische Maschine sowohl in der motorischen als auch in der erzeugenden Phase gleich effizient ist.

$$P_{Em,loss} = b\omega_{Em}|T_{Em}|$$

Batterie

In dieser Arbeit wird ein Hochspannungs-Lithium-Ionen-Akku als Rückwand verwendet. Zur Modellierung der Batterie werden typischerweise Ersatzschaltbildmodelle verwendet. Es gibt komplexe Ersatzschaltbilder, die die dynamischen Effekte in der Batterie besser beschreiben. Einfachere Ersatzschaltbilder sind jedoch rechnerisch günstiger. In der vorliegenden Arbeit wird ein einzelner Innenwiderstand R_B , wie in Abbildung 3-27 dargestellt, zur Modellierung der Batterie verwendet. Außerdem wird die Dynamik der Batteriespannung in der Energiemanagementstrategie ignoriert, da die Systemdynamik sehr schnell ist. Daher wird nur die langsame Dynamik des Batterie-SOC berücksichtigt. Der Batteriestrom I_B wird in Abhängigkeit von der Leerlaufspannung V_{OC} , der elektrischen Leistung $P_{Em,el}$ und dem Innenwiderstand R_B berechnet.

$$I_B = \left(V_{OC} - \sqrt{V_{OC}^2 - 4R_B P_{Em,el}} \right) / 2R_B$$

Die Leerlaufspannung und der Innenwiderstand variieren in Abhängigkeit vom SOC und der Batterietemperatur. Innerhalb des Betriebsbereichs des SOC ist die Variation gering und kann vernachlässigt werden. Aufgrund des Thermomanagements der

Batterie durch den Niedertemperatur-Kühlkreislauf im Fahrzeug kann der Temperatureinfluss für den COM vernachlässigt werden. Diese Schwankungen werden jedoch im High-Fidelity-Modell berücksichtigt.

Die elektrische Leistung der Batterie ist die Summe aus mechanischer Ausgangsleistung und Verlustleistung der E-Maschine. Die Leistungsverluste der Batterie sind in den Leistungsverlusten der E-Maschine für den COM enthalten.

$$P_{\text{Bat,el}} = \omega_{\text{Em}} T_{\text{Em}} + P_{\text{Em,loss}}$$

wobei ω_{Em} die Drehgeschwindigkeit der elektrischen Maschine ist. Unter Verwendung der Kapazität der Batterie Q_B ist die Dynamik für den Ladezustand schließlich gegeben durch,

$$\dot{\zeta}_B = \frac{I_B}{Q_B} = \frac{-V_{\text{OC}} + \sqrt{V_{\text{OC}}^2 - 4R_B P_{\text{Bat,el}}}}{2R_B Q_B}$$

Energiemanagementsystem

In diesem Abschnitt wird ein Regler für das Energiemanagementsystem (EMS) entwickelt. Ziel des EMS-Reglers ist es, eine gewünschte Geschwindigkeit zu verfolgen und dabei den Kraftstoffverbrauch zu minimieren und den Ladezustand der Batterie zu erhalten. Das OCP für den EMS-Regler wird mit den Zustandsvariablen $x = [v_{\text{Ego}} \quad \zeta_B]^T$, Steuereingängen $u = [T_{\text{Eng}} \quad T_{\text{Mot}} \quad T_{\text{Brk}}]^T$ und Ausgangsvariablen $y = [v_{\text{Ego}} \quad \zeta_B \quad \dot{m}_{\text{Fu}}]^T$ formuliert.

$$\min_{x(\cdot), u(\cdot)} \int_0^T \left[c_{\text{Vel}} (v_{\text{Ego}} - v_{\text{Ego,Ref}})^2 + c_{\text{Fu}} (\dot{m}_{\text{Fu}})^2 + c_{\text{Soc}} (\zeta_B - \zeta_{B,\text{Ref}})^2 + c_{\text{Brk}} (T_{\text{Brk}})^2 \right] dt$$

$$\text{s.t.} \quad T_{\text{Eng}}^{\min} < T_{\text{Eng}} < T_{\text{Eng}}^{\max}$$

$$T_{\text{Mot}}^{\min} < T_{\text{mot}} < T_{\text{Mot}}^{\max}$$

$$T_{\text{Brk}}^{\min} < T_{\text{Brk}} < 0$$

$$\zeta_B^{\min} < \zeta_B < \zeta_B^{\max}$$

$$0 \leq v_{\text{Ego}}$$

Das Geschwindigkeitsprofil des WLTC-Fahrzyklus wird als Referenzgeschwindigkeit $v_{\text{Ego,Ref}}$ betrachtet. Die Strafe auf die Differenz zwischen Ist- und Referenzgeschwindigkeit stellt sicher, dass die Geschwindigkeit in allen Situationen nachgeführt wird und die Fahreranforderung erfüllt wird. Der Referenzzustand der Ladung $\zeta_{B,\text{Ref}}$ wird während des gesamten Zyklus auf einem konstanten Wert von 50% gehalten, um einen Ladeerhaltungsbetrieb zu simulieren. T_{Brk} wird in der Kostenfunktion bestraft,

damit beim Bremsen mit der E-Maschine P2 eine maximale Rekuperation durchgeführt werden kann. Außerdem wird dadurch sichergestellt, dass der Controller beim Beschleunigen kein Drehmoment von den Reibungsbremsen abfordert.

Die Sollwerte für Geschwindigkeit und SOC werden in der aktuellen Formulierung, die als eingefrorene MPC bezeichnet wird, über den gesamten Vorhersagehorizont konstant gehalten. Bei der perfekten Vorhersage wird davon ausgegangen, dass zu jedem Zeitpunkt eine perfekte Vorhersage der zukünftigen Geschwindigkeit und des SOC über den Vorhersagehorizont verfügbar ist.

Die maximal und minimal zulässigen Betriebsgrenzen werden als Nebenbedingungen für die drei Steuereingänge verwendet. Die obere Grenze für den Ladezustand ζ_B soll sicherstellen, dass die Batterie in einem hocheffizienten Betriebsbereich bleibt und außerdem eine vollgeladene Batterie während der Rekuperationsphasen vermeiden. Während die untere Grenze für ζ_B sicherstellen soll, dass die Batterie nicht vollständig entladen wird und zumindest in der Lage ist, den Motor einzuschalten, wenn der Motor zum Antrieb des Fahrzeugs benötigt wird. Die Beschränkung der Geschwindigkeit v_{Ego} soll verhindern, dass das Fahrzeug in die entgegengesetzte Richtung fährt.

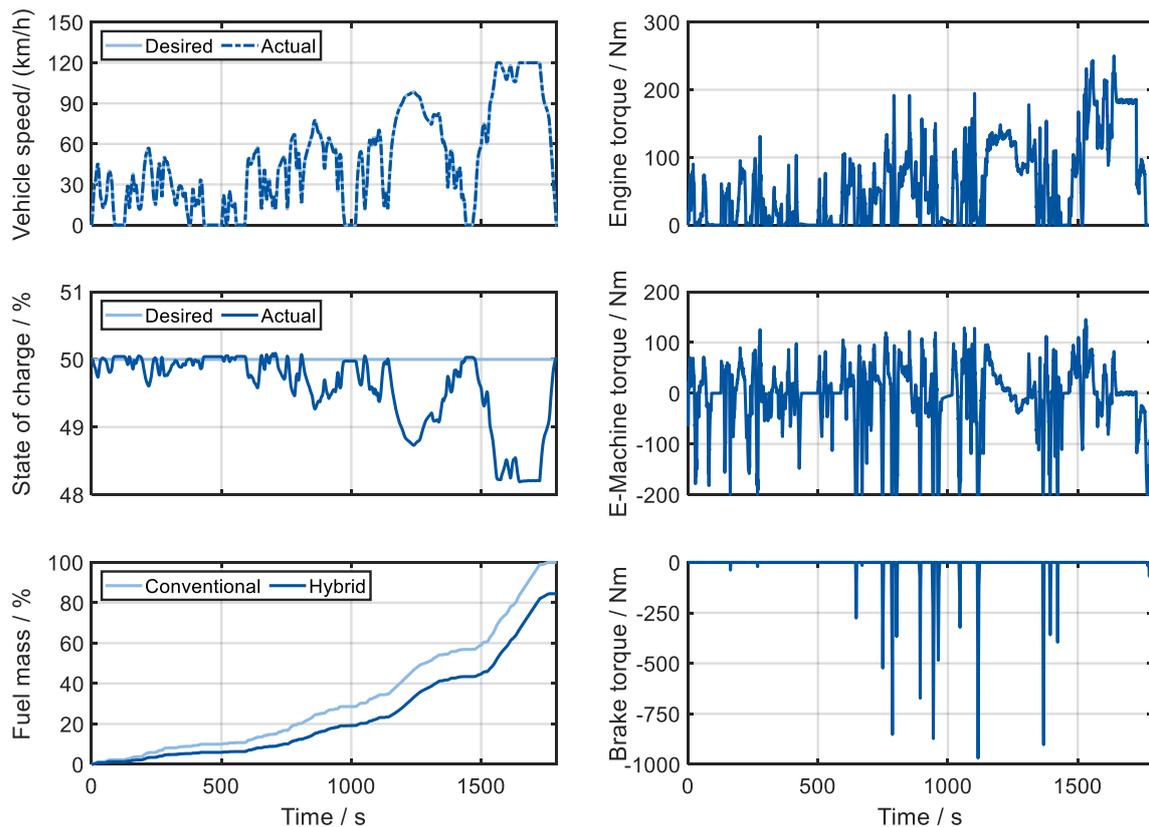


Abbildung 3-28: Simulationsergebnisse für die Geschwindigkeitsnachführung im WLTC-Zyklus

Es wird angenommen, dass das Starten und Stoppen des Verbrennungsmotors sowie das Schließen und Öffnen der Kupplung augenblicklich erfolgen, und es wird

keine Strafe für die Motorstarts und Kupplungsverluste in der aktuellen OCP berücksichtigt. Zusätzlich wird angenommen, dass der Motor ausgeschaltet und die Kupplung geöffnet ist, wenn der Raddrehmomentbedarf negativ ist. Die Schaltvorgänge werden mit einer regelbasierten Steuerung in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Drehmomentbedarf durchgeführt. Es wird angenommen, dass in allen Gängen und bei allen Fahrzeuggeschwindigkeiten eine vollständige Rekuperation von bis zu 200 Nm Drehmoment an der E-Maschine stattfindet.

Die Simulationsergebnisse für den EMS-Regler sind in Abbildung 3-28 dargestellt. Für die obigen Simulationen wird eine Abtastzeit von 0,01 s und ein Vorhersagehorizont von 0,3 s verwendet. Das Simulationsmodell, bei dem nur der Motor das Fahrzeug antreibt, wird für den WLTC-Zyklus ausgeführt. Der aus dieser Simulation erhaltene Kraftstoffverbrauch wird zum Vergleich mit dem Kraftstoffverbrauch herangezogen, der für den gleichen Fahrzyklus erhalten wird, wenn das Fahrzeug als Hybridfahrzeug gefahren wird, bei dem der entwickelte Energiemanagementregler für die optimale Drehmomentaufteilung verwendet wird. In Abbildung 3-28 ist zu sehen, dass das Fahrzeug in der Lage ist, der gewünschten Geschwindigkeit recht gut zu folgen. Der Wert des Root Mean Square Error (RMSE) zwischen der Sollgeschwindigkeit und der Istgeschwindigkeit beträgt nur 0,06 km/h für den gesamten Fahrzyklus. Der Batterie-SOC liegt während des gesamten Fahrzyklus nahe dem Referenzwert von 50%. Die Kosten für den SOC werden so angepasst, dass der endgültige SOC nahe am Ziel-SOC liegt, um einen ladungserhaltenden Betrieb zu gewährleisten. Der entwickelte Regler ist in der Lage, das Drehmoment optimal zwischen dem Motor, der elektrischen Maschine und den Reibungsbremsen aufzuteilen, ohne die Randbedingungen zu verletzen. Im Vergleich zum konventionellen Antriebsstrang wird bei Verwendung der NMPR-Strategie ein Vorteil von ca. 15,53 % im Kraftstoffverbrauch beobachtet. Es ist jedoch zu beachten, dass der maximale Kraftstoffverbrauchsvorteil aus der Rekuperation resultiert. Ein weiterer Verbrauchsvorteil kann durch eine optimale Auswahl des SOC-Sollwerts erzielt werden.

Kaskadierter Geschwindigkeitsregler

In diesem Abschnitt wird die adaptive Geschwindigkeitsregelung (ACC) mit einer Energiemanagementregelung kombiniert, um einem vorausfahenden Fahrzeug zu folgen. Das Blockdiagramm der Regler in kaskadierter Form ist in Abbildung 3-29 zu sehen. Der adaptive Geschwindigkeitsregler ist mit einem modellprädiktiven Regler ausgelegt. Das Ziel des ACC ist es, dem vorausfahenden Fahrzeug in einem sicheren Abstand zu folgen bzw. bei Abwesenheit des vorausfahenden Fahrzeugs mit einer konstanten Sollgeschwindigkeit zu fahren. Der Betrieb des ACC kann in zwei Modi unterteilt werden: Abstandsregelung und Geschwindigkeitsregelung. Bei der Geschwindigkeitsregelung fährt das Fahrzeug mit einer konstanten, vom Fahrer eingestellten Geschwindigkeit oder es ist die Fahrgeschwindigkeitsgrenze. Bei der Abstandsregelung fährt das Fahrzeug mit einem sicheren Abstand hinter einem vorausfahenden Fahrzeug. ACC sorgt auch dafür, dass die Beschleunigung in den Komfortgrenzen bleibt.

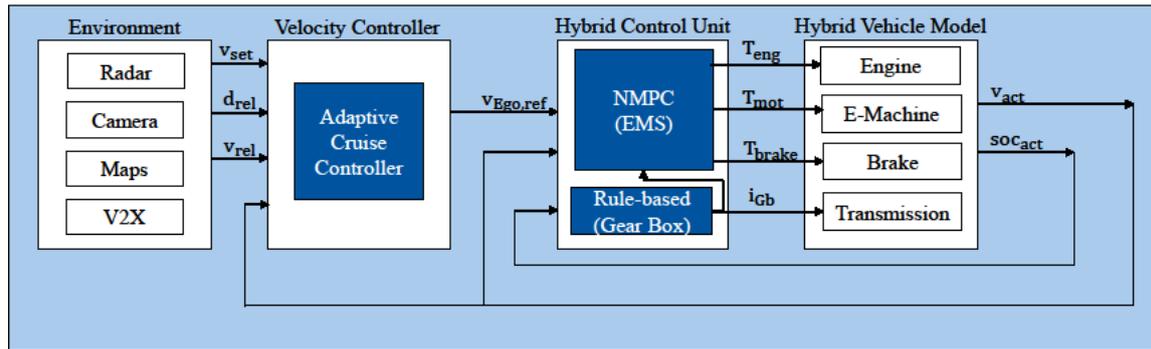


Abbildung 3-29: Schematische Darstellung des kaskadierten Geschwindigkeitsreglers

Die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs, die Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs und der Abstand zum Führungsfahrzeug werden für den Betrieb des ACC-Reglers benötigt. Das Schema des folgenden Szenarios für das Auto ist in Abbildung 3-30. Hier ist der ACC-Controller jedoch auf die vorherigen drei Signale beschränkt. Radar-, GPS-, Kamera- usw. Sensoren können verwendet werden, um die erforderlichen Signale zu messen. Das Demonstrator Fahrzeug ist mit Radarsensoren ausgestattet und wird mit einem V2V-Kommunikationsgerät ausgestattet. Es wird davon ausgegangen, dass diese Sensoren verwendet werden, um die Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs und den relativen Abstand zu schätzen. Der Sicherheitsabstand ist abhängig von der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs. Der Sicherheitsabstand d_{safe} ist abhängig von der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs.

$$d_{safe} = d_{Min} + t_{hw}v_{Ego}$$

wobei t_{hw} ein zeitlicher Abstand ist, es ist die Zeit, die das Ego-Fahrzeug benötigt, um die aktuelle Position des vorausfahrenden Fahrzeugs zu erreichen; d_{Min} ist der Mindestabstand, der immer zwischen dem vorausfahrenden und dem Ego-Fahrzeug eingehalten werden soll.

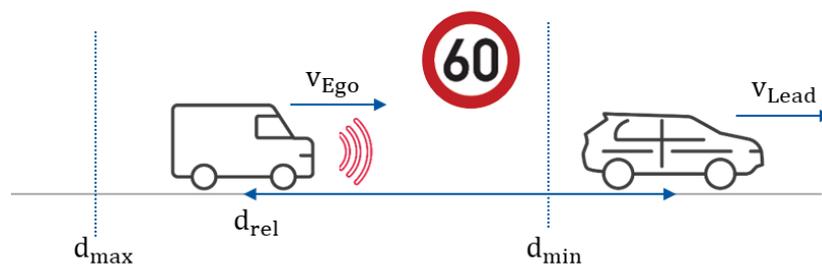


Abbildung 3-30: Auto folgendes Szenario

Das NMPC-Schema wird wieder für die Berechnung der gewünschten Geschwindigkeit verwendet. Das regelungstechnische Modell, das zur Vorhersage des Anlagenverhaltens in der MPC verwendet wird, spielt eine wichtige Rolle. Je näher das Modell an der Realität ist, desto besser ist die Leistung des Reglers. Die Verwendung eines komplexen Modells, das auch das nichtlineare Verhalten berücksichtigt, führt jedoch

zu einem hohen Rechenaufwand. Daher muss ein Einfaches, aber ausreichend komplexes Modell verwendet werden. Für das ACC-Problem sind die Zustandsvariablen $x = [v_{Ego} \ d_{Rel}]^T$. Der Steuereingang ist $u = [a_{Ego}]$, der zur Steuerung von $y = [v_{Ego} \ a_{Ego}]^T$ verwendet wird. Das OCP für ACC ist gegeben durch,

$$\begin{aligned} \min_{x(\cdot), u(\cdot)} \int_0^T & \left[c_{Vel} (v_{Ego} - v_{Ego,Ref})^2 + c_{Acc} (a_{Ego})^2 + c_{Dis} (d_{Slack})^2 \right] dt \\ \text{s.t.} \quad & \dot{d}_{Rel} = v_{Lead} - v_{Ego} \\ & \dot{v}_{Ego} + 0.08 * \ddot{v}_{Ego} = a_{Ego} \\ & a_{Ego}^{min} < a_{Ego} < a_{Ego}^{max} \\ & d_{Safe} - d_{Slack} \leq d_{Rel} \\ & 0 \leq v_{Ego} \\ & 0 \leq \delta \end{aligned}$$

Die Dynamik zwischen der Ego-Geschwindigkeit und der Beschleunigung wird durch das offene Regelkreisverhalten mit dem High-Fidelity-Fahrzeugmodell und dem Energiemanagementregler im Regelkreis ermittelt. Es wird angenommen, dass das Führungsfahrzeug mit dem WLTC-Geschwindigkeitsprofil fährt. Die Referenz für die Ego-Geschwindigkeit v_{Ego} ist nicht die Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs v_{Lead} , sondern die vom Fahrer festgelegte Geschwindigkeitsgrenze oder Sollgeschwindigkeit. Damit soll sichergestellt werden, dass die Ego-Geschwindigkeit v_{Ego} das Geschwindigkeitslimit oder die Sollgeschwindigkeit nicht überschreitet. Virtuelle Geschwindigkeitsbegrenzungen werden für die vier verschiedenen Abschnitte des WLTC-Zyklus berücksichtigt.

Das Nachfahren bzw. das Ego-Fahren wird durch die Nebenbedingung des relativen Abstandes d_{Rel} sichergestellt. Diese Zwangsbedingung stellt sicher, dass der relative Abstand immer größer ist als der Sicherheitsabstand zum führenden Fahrzeug. Diese harte Randbedingung für den relativen Abstand d_{Rel} kann jedoch zu einem unlösbaren QP-Problem führen, d. h. der NMPC-Regler ist nicht in der Lage, eine Lösung zu finden, ohne eine Randbedingung zu verletzen. Um ein solches Unerfüllbarkeitsproblem zu vermeiden, wird eine zusätzliche Schlupfvariable d_{Slack} verwendet, um die Bedingung für den relativen Abstand abzuschwächen. Die Schlupfvariable wird in der Kostenfunktion bestraft, um nur eine geringe Verletzung der relativen Abstandsbedingung zuzulassen.

Die Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs a_{Ego} wird ebenfalls in der Kostenfunktion bestraft. Dies dient dazu, ein gleichmäßigeres Beschleunigungsprofil und damit ein gleichmäßigeres Fahrgefühl zu erhalten. Zusätzlich wird das a_{Ego} durch die physikalischen Randbedingungen begrenzt und daher wird eine minimale und maximale

Grenze des a_{Ego} im OCP berücksichtigt. Die Einschränkung für v_{Ego} soll sicherstellen, dass das Fahrzeug nicht in die entgegengesetzte Richtung fährt.

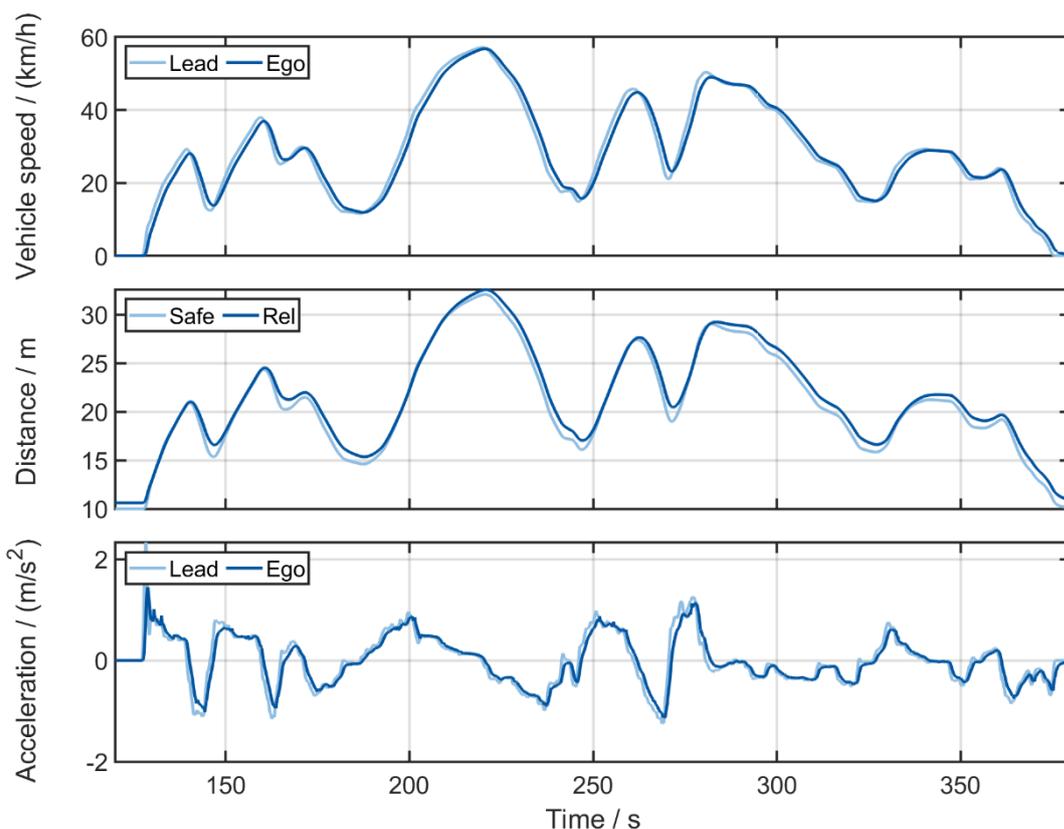


Abbildung 3-31: Simulationsergebnisse des kaskadierten Geschwindigkeitsreglers

Die Simulationsergebnisse der kaskadierten Geschwindigkeitsregelung sind in Abbildung 3-31 dargestellt. Der relative Abstand zwischen Ego- und Führungsfahrzeug wird immer oberhalb des minimalen Sicherheitsabstands gehalten. Das Beschleunigungsprofil des Ego-Fahrzeugs ist gleichmäßiger als das des Führungsfahrzeugs, was zu einem besseren Fahrkomfort führt, der auch einer der Terme in der Kostenfunktion ist. Insgesamt wurde für das Ego-Fahrzeug ein Verbrauchsvorteil von 1,4 % im Vergleich zum Führungsfahrzeug erreicht.

Dieser Vorteil kann durch die Abstimmung der Gewichte in der Kostenfunktion weiter verbessert werden, was jedoch auf Kosten eines schlechteren Fahrkomforts geht. Aufgrund des kaskadierten Ansatzes hat die Geschwindigkeitsregelung keinen direkten Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Daher wird ein integrierter Regelungsansatz, bei dem sowohl die Geschwindigkeitsregelung als auch das Energiemanagement in einem einzigen OCP kombiniert werden, den Kraftstoffverbrauchsvorteil weiter verbessern.

3.3 Demonstration an einem Plug-In Versuchsfahrzeug

Für die Fahrzeugversuche wurde ein von der FEV für dieses Projekt zur Verfügung gestelltes Demonstratorfahrzeug eingesetzt. Die MicroAutoBox II (MABX) von dSPACE wird als Kommunikationsschnittstelle zu allen neu hinzugefügten Komponenten im Fahrzeug und zur Implementierung der Funktionalitäten der Hybrid Control Unit (HCU) verwendet. Eine Übersicht über die OCT-Verbindungen, wie sie in das Demonstrator-Fahrzeug integriert sind, zeigt Abbildung 3-32.

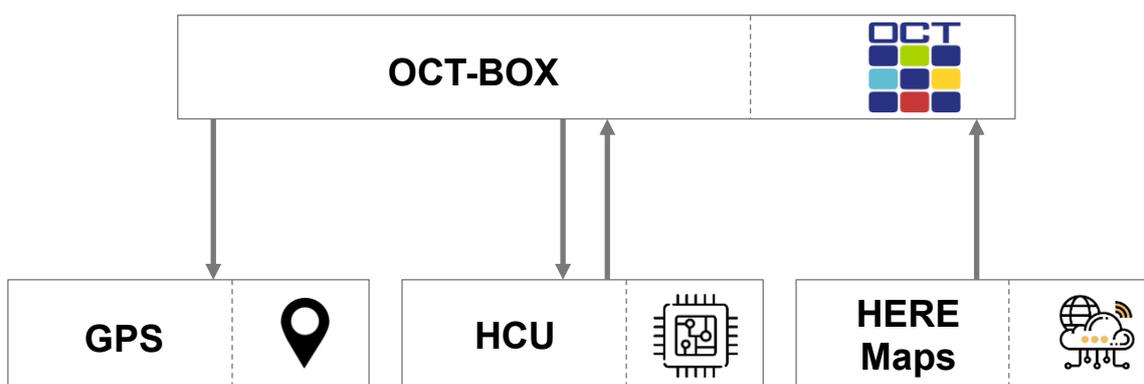


Abbildung 3-32: Integration der OCT-Box in das Demonstratorfahrzeug

OCT-HCU interface

Die Kommunikation zwischen OCT und Hybrid Control Unit (HCU) wurde über eine CAN-Schnittstelle realisiert. Die vorhandene Software der HCU wurde modifiziert, um die folgenden Signale vom OCT zu empfangen.

1. Anforderung zum Einschalten des Motors
2. Motor Ein-Anforderung
3. Ziel-SOC

Das Signal zum Verhindern eines Verbrennungsmotorstarts wird vom OCT gesendet, wenn der E-Antrieb während eines Teils der Fahrt unbedingt erforderlich ist, z. B. in einer Nullemissionszone. Das OCT hat die Möglichkeit, einen Ziel-SOC für die Hochspannungsbatterie unter Berücksichtigung der gesamten Fahrtinformationen anzufordern, so dass ein ausreichender SOC zum elektrischen Fahren in der Nullemissionszone beibehalten werden kann.

OCT-HERE-Maps API

Routeninformationen sowie Echtzeit-Verkehrsdaten werden über die Cloud-Verbindungsschnittstelle und eine von einem mobilen Hotspot bereitgestellte Internetverbindung von den Routing-Servern von HERE Maps abgerufen. Das Abrufen der gewünschten Routeninformationen erfordert die Angabe eines Start- und eines Zielpunktes, die vom Benutzer auf der Weboberfläche des OCT eingestellt werden. Zusätzlich können bei Bedarf weitere Zwischenstopps für die Route eingefügt werden. Die Ausgabe liefert Wegpunkte mit den in Tabelle 4-4 angegebenen Daten:

Daten	Beschreibung
Breitengrad	Breitengrad des Wegpunkts, mit einer Genauigkeit von 1,11 cm
Längengrad	Längengrad des Wegpunkts, mit einer Genauigkeit von 1,11 cm
Höhe	Höhe des Wegpunkts über dem Meeresspiegel
Geschwindigkeitsbegrenzung	Permanente Geschwindigkeitsbegrenzung des Wegpunkts
Basiszeit	Zeit, die für die Strecke zwischen zwei Wegpunkten benötigt wird, wobei die Faktoren berücksichtigt werden: <ul style="list-style-type: none"> • Verkehrssignale und Schilder • Kreisverkehre • Straßenkrümmung und Steigung • Temporäre Geschwindigkeitsbegrenzungen
Basisgeschwindigkeit	Geschwindigkeit des Fahrzeugs zwischen zwei Wegpunkten unter Berücksichtigung der gleichen Faktoren wie die "Basiszeit"
Verkehrszeit	Zeit, die für die Strecke zwischen zwei Wegpunkten unter Berücksichtigung der in 'Basiszeit' beschriebenen Faktoren und des Echtzeitverkehrsflusses benötigt wird
Verkehrsgeschwindigkeit	Geschwindigkeit des Fahrzeugs zwischen zwei Wegpunkten, wobei die gleichen Faktoren wie bei 'Verkehrszeit' berücksichtigt werden
Staufaktor	Eine Zahl zwischen -1 und 10, die die erwartete Reisequalität angibt, wobei -1 für einen freien Verkehrsfluss und 10 für ein hohes Stauaufkommen steht

Tab. 3-4: Wegpunktdaten für die Fahrt, die von HERE Maps bereitgestellt werden

OCT to GPS

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, empfängt die OCT-Box die Positionsinformationen des Ego-Fahrzeugs vom GPS mit einer Antenne, die auf dem Dach des Demonstrationsfahrzeugs angebracht wurde. Das GPS liefert neben den Positionsinformationen, und deren jeweiligen Ungenauigkeiten auch Informationen über die Ego-Fahrzeuggeschwindigkeit.

Routeninformationen und von HERE-Maps abgefragte Echtzeit-Verkehrsdaten werden im lokalen Datenspeicher abgelegt, diese Daten können ähnlich wie die GPS-Daten entweder zur Online-Optimierung für die übergeordnete Steuerung des Fahrzeugs lokal genutzt werden. Alternativ können sie auch an die anderen Steuergeräte im CAN-Netzwerk weitergegeben werden.

Abbildung 3-33 zeigt die Informationen einer ausgewählten Route (Abbildung 3-34) in der Stadt Aachen, wie sie von HERE-Maps bereitgestellt werden. Die Route enthält Abschnitte in Gebieten mit hoher Verkehrsdichte sowie einen Autobahnabschnitt (mit geringer Verkehrsdichte). Anhand der Höhenangaben der Wegpunkte sowie der

Entfernung zwischen zwei Wegpunkten kann die Steigung des Straßenabschnitts ermittelt werden. In Kombination mit der Basiszeit/Geschwindigkeit kann eine Abschätzung des Energieverbrauchs für das Fahrzeug entlang der gegebenen Route modelliert werden.

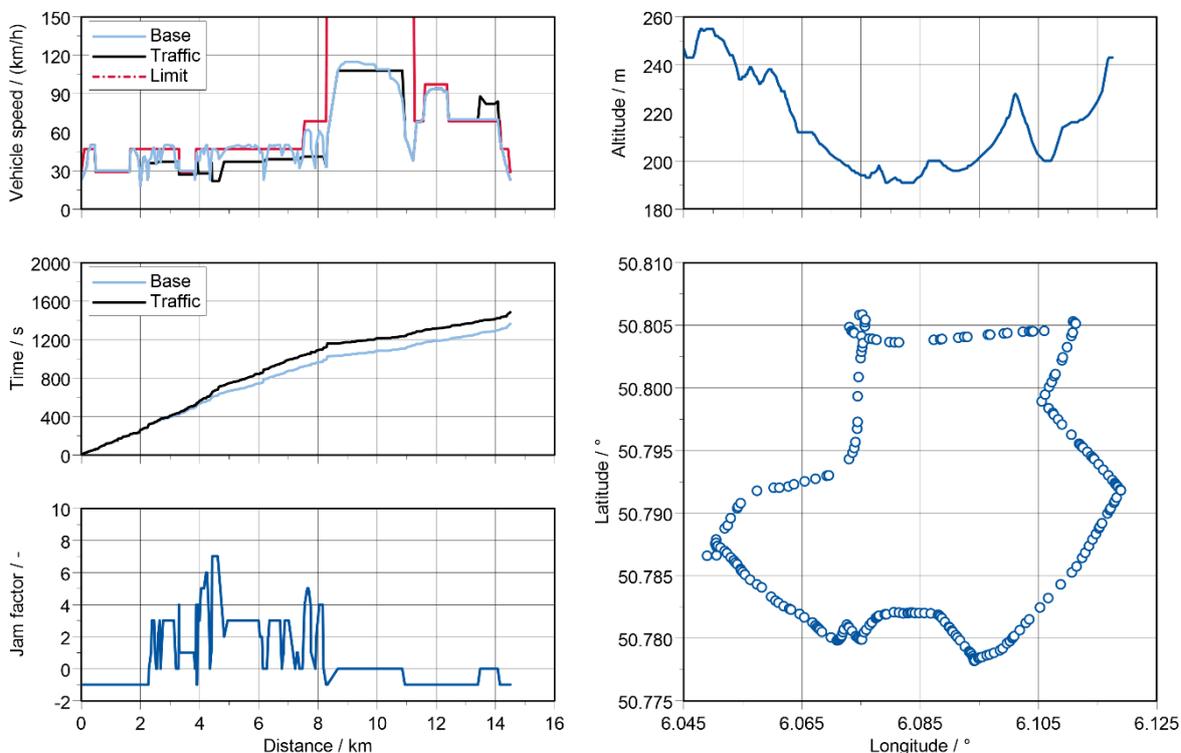


Abbildung 3-33: Reise- und Verkehrsdaten, die das OCT von HERE Maps erhält

Vorausschauendes Thermomanagement

Die Fahr- und Verkehrsdaten von OCT werden verwendet, um eine vorausschauende Wärmemanagementstrategie am Demonstratorfahrzeug zu demonstrieren. Der typische Betrieb eines Plug-in-Hybridfahrzeugs besteht darin, innerhalb der Stadt elektrisch zu fahren und den Motor außerhalb der Stadt in Hochgeschwindigkeitsabschnitten wie der Autobahn zu nutzen. Da der erste Motorstart auf der Autobahn erfolgt, stellt diese Strategie aufgrund des kalten Motors und des Abgasnachbehandlungssystems (EATS) auf den ersten Kilometern eine große Herausforderung in Bezug auf die Auspuffemissionen dar. Um diese hohen anfänglichen Auspuffemissionen zu vermeiden, sollte das EATS vor dem Einfahren auf die Autobahn vorgeheizt werden.

Bei Fahrzeugen, die mit aktiven Katalysatorheizsystemen wie dem elektrisch beheizten Katalysator (EHC) ausgestattet sind, können diese Systeme vor der Auffahrt auf die Autobahn ausgelöst werden. In dem in diesem Projekt verwendeten Demonstratorfahrzeug ist ein solches System nicht vorhanden. Daher sollte ein leicht verfrühter Motorstart vorhergesagt und realisiert werden, um den EATS vorzuheizen und die erforderliche Light-Off-Temperatur vor der Auffahrt auf die Autobahn zu erreichen. Um diese prädiktive Thermomanagement-Strategie zu demonstrieren, wird die in Abbildung 3-34 gezeigte Strecke in Aachen gewählt, bei der der Start und das Ende der Fahrt vom VKA aus erfolgt.

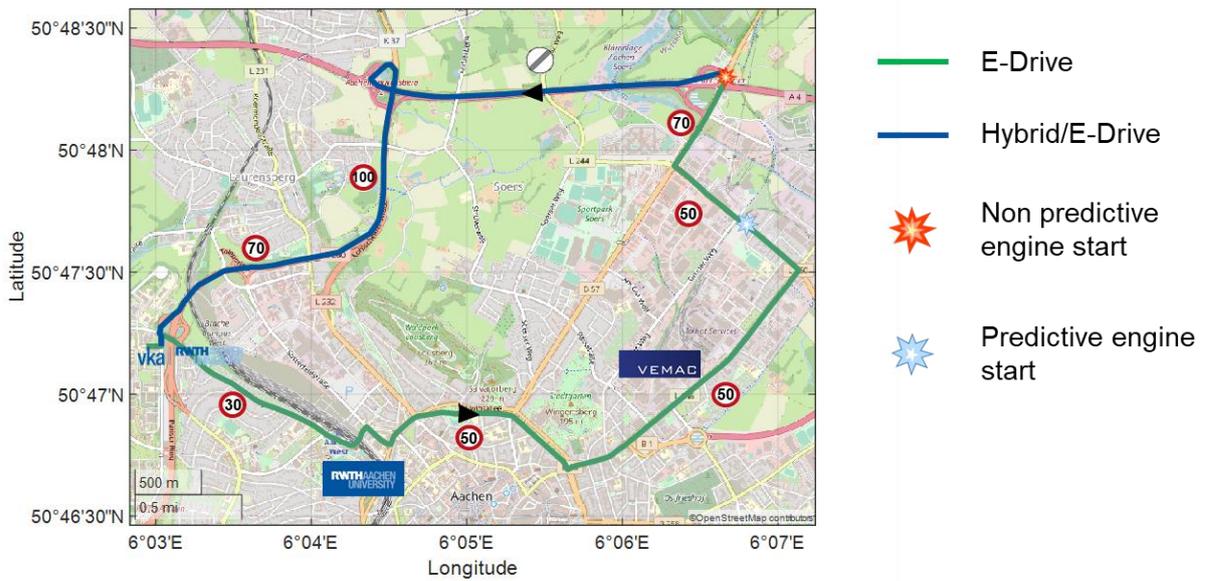


Abbildung 3-34: Ausgewählte Strecke in Aachen zwischen VKA und VEMAC zur Demonstration der vorausschauenden Wärmemanagement-Strategie

Die Gesamtlänge der Fahrt beträgt 14,5 km. Die ersten 8,2 km (grün) werden überwiegend im Stadtverkehr zurückgelegt, daher wird ausschließlich der E-drive verwendet. Ab 8,2 km bis zum Ende (blau) besteht die Fahrt aus Hochgeschwindigkeitsabschnitten aufgrund von Autobahn- und Landstraßenfahrten, wie in Abbildung 3-34 zu sehen ist. Daher wird ein paralleler Hybridbetriebsmodus verwendet, bei dem sowohl der Motor als auch die E-Maschine benötigt werden, um die erforderliche hohe Last in diesem Streckenabschnitt bereitzustellen.

Nicht-prädiktive Strategie

Als Referenzmessung wird die nicht prädiktive Strategie zunächst am Demonstratorfahrzeug getestet und die Ergebnisse sind in Abbildung 3-35 dargestellt. Der erste Motorstart erfolgte bei km 8,64 auf der Autobahnauffahrt aufgrund eines hohen Radmomentbedarfs während der Beschleunigung des Fahrzeugs, um die Geschwindigkeit auf der Autobahn aufzuholen. Da der Motor und das EATS noch kalt sind, führte dies zu einer sehr hohen Spitze bei den NOx-Emissionen des Motors. Die Abbrandtemperatur (220°C) im SCR-Katalysator wurde innerhalb einer Strecke von 1,3 km und einer Zeit von 43,9 s ab dem ersten Motorstart erreicht.

Nicht prädiktiver Motorstart	Motor	Auspuffrohr
Gesamte Reise	100 %	66.3 %
Autobahn	72.5 %	64 %

Tab. 3-5: NOx-Emissionen für nicht prädiktive Strategie

Während dieses Zeitraums ist der SCR-Wirkungsgrad sehr schlecht und die meisten NOx-Emissionen aus dem Motor gelangen durch das Auspuffrohr in die Umgebung,

wie in Abbildung 3-35 zu sehen ist. Das Fahrzeug ist mit einem NO_x-Sensor ausgestattet, aber aufgrund der schlechten Genauigkeit des Sensors bei niedrigen Temperaturen werden in dieser Arbeit nur die modellierten NO_x-Emissionen aufgezeichnet und für die Analyse verwendet. Während des Autobahnbetriebs machen die NO_x-Emissionen aus dem Motor 72,5 % der gesamten NO_x-Emissionen der Fahrt aus, und 88,4 % dieser NO_x-Emissionen aus dem Motor gehen durch das Auspuffrohr.

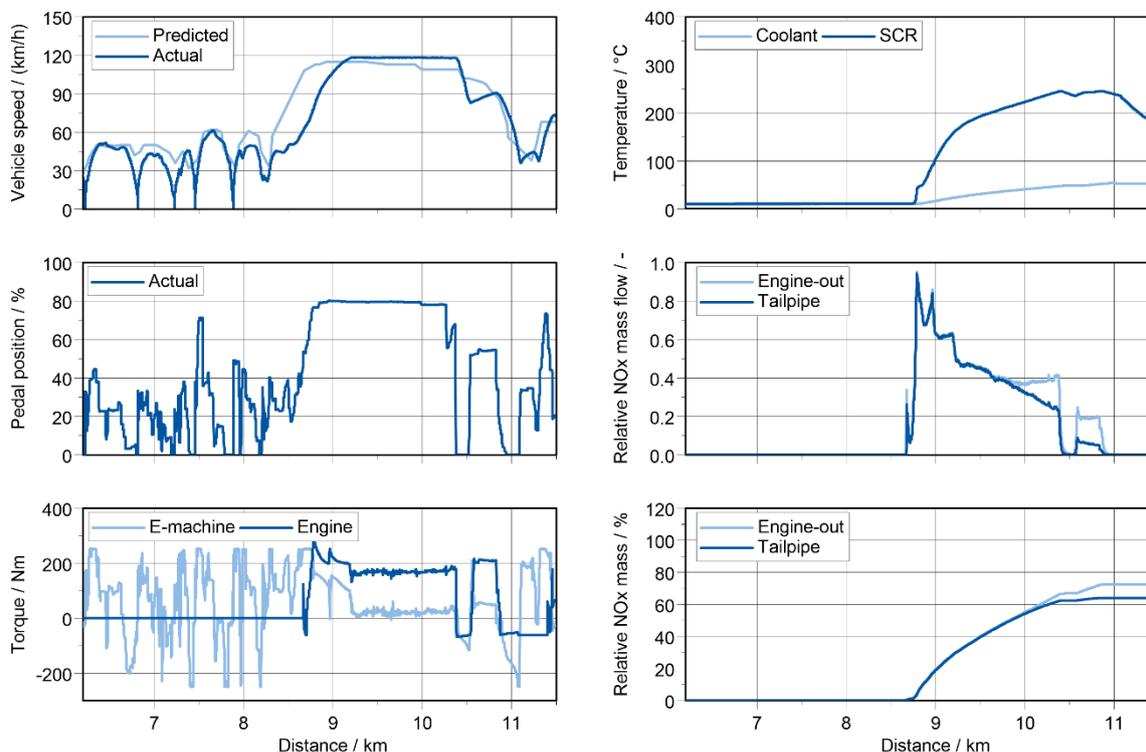


Abbildung 3-35: NO_x-Emissionen einer nicht prädiktiven Motorstartstrategie bei einer Umgebungstemperatur von 6,5°C und NH₃-Belastung am SCR 0,145 g/l

Prädiktive Motorstartstrategie

Um die hohen NO_x-Emissionen nach Abgasanlage zu vermeiden, ist ein Frühstart erforderlich, um das EATS vor der Auffahrt auf die Autobahn auf Leichtlaufemperatur vorzuwärmen. Die Simulationen wurden mit dem in Kapitel 4.2.3 vorgestellten High-Fidelity-Fahrzeugmodell durchgeführt, indem der Motorstart gegenüber der nicht prädiktiven Strategie iterativ vorverlegt wurde. Ein früher Motorstart führt zu einem frühen Anlassen des Katalysators, aber auch zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch. Bei einem späten Motorstart ist das Abschalten des Katalysators vor der Auffahrt auf die Autobahn möglicherweise nicht gewährleistet. Daher wurde in den Simulationen für den Motorstart zwischen 6,5 und 7 km ein Optimum in Bezug auf Kraftstoffverbrauch und Emissionen ermittelt.

Vorausschauender Motorstart	Motor	Auspuffrohr
Gesamte Fahrt	130.3 %	54.7 %
Zwischen dem ersten Motorstart und der Einfahrt auf die Autobahn	37.4 %	36.7 %

Autobahn	75.3 %	24.4 %
----------	--------	--------

Tab. 3-6: NOx-Emissionen für prädiktive Motorstartstrategie

Abbildung 3-36 zeigt die Ergebnisse dieser Strategie, bei der der erste Motorstart bei einer Entfernung von 6,84 km an einer Rotlichtampel bei stehendem Fahrzeug realisiert wurde. Der Test wurde zu einer ähnlichen Tageszeit durchgeführt und die NOx-Belastung des SCR wurde ähnlich wie bei der nicht prädiktiven Strategie vorkonditioniert. Da das Fahrzeug während des ersten Motorstarts stand, befand sich der Motor im Leerlauf und daher wurde die erste Spitze der NOx-Emissionen aus dem Motor um 44 % reduziert. Während des Abbremsens des Fahrzeugs wird die Antriebskupplung geöffnet und der Motor im Leerlauf gehalten, um die Temperatur zu halten. Beim anschließenden Anfahren des Fahrzeugs wird die Kupplung wieder eingerückt und der Motor mit der P2-Maschine zum parallelen Hybridbetrieb gekoppelt. Während dieser Kopplungsphasen sind kleine Spitzen in den NOx-Emissionen zu sehen.

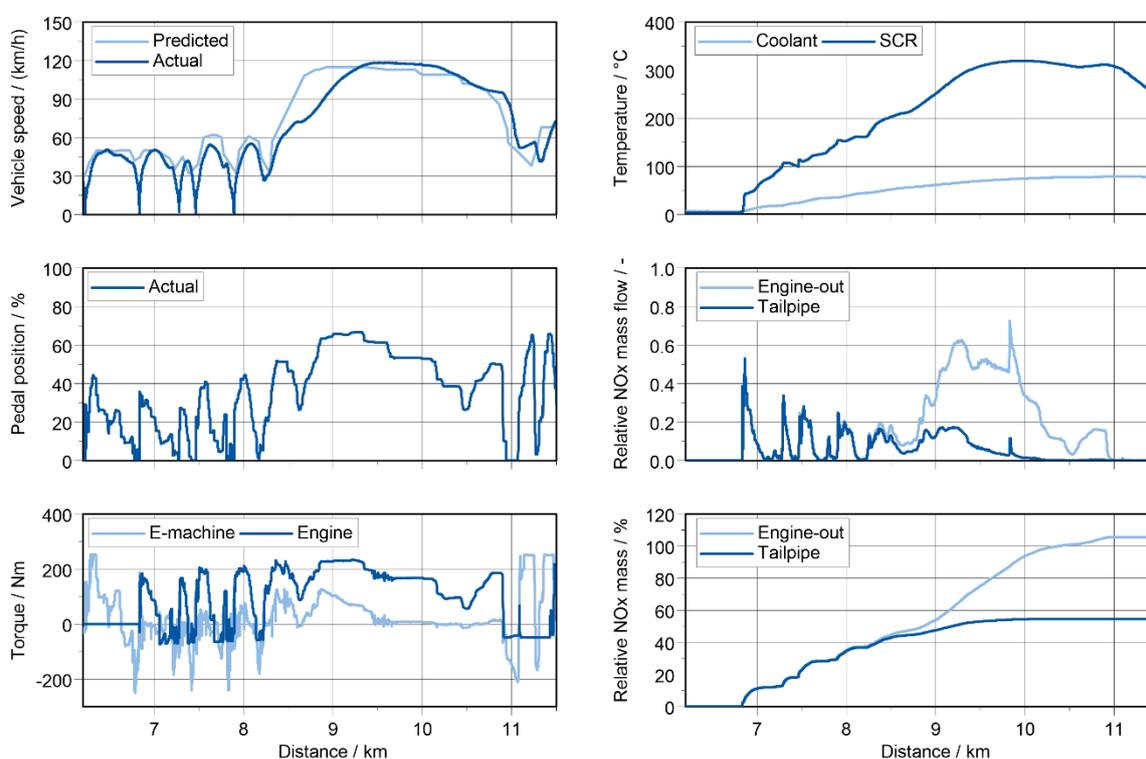


Abbildung 3-36: NOx-Emissionen einer prädiktiven Motorstartstrategie bei einer Umgebungstemperatur von 9,5°C und NH3-Belastung des SCR 0,141 g/l

Bei einer Entfernung von 8,78 km hat die Temperatur im SCR bereits 220 °C erreicht. Während des Hochlastbetriebs des Motors auf der Autobahn hat die SCR einen Wirkungsgrad von nahezu 100 % erreicht und ein starker Anstieg der NOx-Emissionen im Auspuff kann vermieden werden. Obwohl das Geschwindigkeitsprofil der prädiktiven und der nicht-prädiktiven Strategie unterschiedlich ist, sind die NOx-Emissionen des Motors während der Autofahrt bei beiden Strategien ähnlich, so dass ein Eins-zu-Eins-Vergleich möglich ist. Die prädiktive Motorstartstrategie hat eine Gesamtreduktion der NOx-Emissionen nach Abgasanlage von 19 % im Vergleich zur

nicht-prädiktiven Strategie. Dieser Vorteil kann durch die Verbesserung des Motorstartprozesses durch BSG und auch des Motorverknüpfungsprozesses weiter gesteigert werden.

4 Fazit

Im Rahmen des durchgeführten Forschungsprojekts STEP hat die VEMAC das Online Calibration Tool, ein eingebettetes System mit Zugriff auf Fahrzeugsteuergeräte, um wichtige Schnittstellen erweitert und im realen Fahrzeugeinsatz getestet. Damit wird es, wie prototypisch in diesem Projekt gezeigt, zukünftig möglich sein, vorausschauende energie- und emissionsreduzierende Fahrfunktionen zu entwickeln. Das OCT konnte neben den neuen technischen Eigenschaften ebenfalls an Benutzerfreundlichkeit gewinnen. Somit konnten wichtige Schritte hinzu zum Markteintritt gemacht werden. Dennoch sind bis zu Markteintritt weitere Schritte erforderlich, die beispielsweise Herstellbarkeit optimieren.

Das große Potenzial der Fahrzeugvernetzung, das in der Literatur bereits für andere Funktionen aufgezeigt wurde, konnte auch für die in diesem Projekt vom VKA entwickelten Algorithmen zur vorausschauenden Fahrzeugsteuerung in den durchgeführten Simulationsstudien bestätigt werden. Bei Simulationsstudien ist generell zu berücksichtigen, dass mit ihnen die Entwicklung in schnellen Feedbackschleifen vorangetrieben und die generelle Umsetzbarkeit und das Potenzial aufgezeigt werden kann. Simulationen können jedoch immer nur einen vereinfachten Ausschnitt aus der Realität abbilden. Messrauschen, besondere Verkehrssituationen (Beispiel: Tesla sieht weißen LKW nicht), menschliches (Fehl-)Verhalten, Restriktionen und Wechselwirkungen von Hardwarekomponenten sowie zufällige Einflussgrößen können in Simulationen meist nicht ausreichend berücksichtigt werden. Dies kann zu einer Fehlbewertung und Fehlfunktion in der Realität führen. Daher stellt die Validierung in einem realen Versuchsfahrzeug die unabdingbare Konsequenz nach erfolgreichen simulativen Tests dar. Entsprechend sollte zukünftig die Validierung sämtlicher entwickelter Fahrfunktionen in realen Versuchsfahrzeugen angestrebt werden. Nur so kann das reale Potenzial ermittelt und ein sicherer Betrieb gewährleistet werden.

Insgesamt konnten mit dem Projekt die gesteckten Ziele erreicht, wertvolle Erkenntnisse in der Schnittstellen- und Funktionsentwicklung im Bereich der Fahrzeugvernetzung gewonnen und der Reifegrad des Online Calibration Tools deutlich verbessert werden.

5 Literaturverzeichnis

- [1] M. Krüger, R. Maier und D. Naber, „Emissionsoptimierung von Diesel-Pkw zur Erfüllung der „Real Driving Emission (RDE) Anforderungen,“ in *24. Aachener Kolloquium*, Aachen, 2015.
- [2] P. Mock, J. German, A. Bandivadekar und I. Riermersma, „Discrepancies between type-approval and "real-world" fuel-consumption and CO2 values,“ *The International Council on Clean Transportation*, 02 2012.
- [3] J. R. Hagena, Z. S. Filipi und D. N. Assanis, „Transient Diesel Emissions: Analysis of Engine Operation During a Tip-In,“ *SAE World Congress*, 2006.
- [4] M. Treiber, A. Kesting und D. Helbig, „Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic,“ *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Bd. 360, Nr. 1, p. 71–88.
- [5] T. Plum, Einfluss moderner Antriebsstränge auf den Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge, Aachen, 2019.
- [6] J. B. Rawlings und D. Q. Mayne, Model predictive control: Theory and design., Madison: Nob Hill Publ, 2009.
- [7] C. Schmid und L. T. Biegler, „Quadratic programming methods for reduced hessian SQP,“ *Computers & Chemical Engineering*, Bd. 18, Nr. 9, p. 817–832, 1994.