



Energieeffizientes Fahren 2014 (EFA2014)

2. Projektphase Erhöhung der Reichweite von Elektrofahrzeugen

Abschlussbericht

Projektlaufzeit: 01.04.2012 – 30.08.2014

Autor: Technische Universität Dresden

Projektleitung (Teilvorhaben): Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik
(Prof. Dr.-Ing. Bernard Bäker)

Sekretariat:

Tel.: 0351 463 34180

Fax: 0351 463 32866

E-Mail: silke.puschendorf@tu-dresden.de

Ansprechpartner Abschlussbericht: Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik
(Dipl.-Ing. Stephan Uebel)

Tel.: 0351 463 38643

Fax: 0351 463 32866

Email: stephan.uebel@tu-dresden.de

Datum: 03.12.2014

Postadresse (Briefe)

TU Dresden, 01062 Dresden

Postadresse (Pakete u.ä.)

TU Dresden, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden

Besucheradresse

Sekretariat: George-Bähr-Str. 1c

Steuernummer

(Inland)

203/149/02549

Umsatzsteuer-Id-Nr.

(Ausland)

DE 188 369 991

Bankverbindung

Deutsche Bundesbank, Filiale Dresden

Konto 85 001 522, BLZ 850 000 00

Internet

<http://tu-dresden.de/fzm>





Co-Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Bernard Bäker
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling
Prof. Dr.-Ing. Oliver Michler
Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop
Prof. Dr.-Ing. Hans Zellbeck

Dipl.-Inf. Norbert Freier
Dipl.-Ing. Dirk Fuchs
Dipl.-Ing. Mario Krumnow
Dipl.-Ing. Christoph Köhler
Dipl.-Ing. Per Lewerenz
Dipl.-Ing. Anja Liebscher
Dipl.-Ing. Renuat Matuschowitz
Dipl.-Ing. Sebastian Pape
Dipl.-Ing. Robert Richter
Dipl.-Ing. Torsten Schubert
Dipl.-Ing. Stephan Uebel

Inhalt

I. Versionsübersicht	4
II. Kurze Darstellung	5
1. Aufgabenstellung	5
2. Voraussetzungen.....	6
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	7
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand	8
5. Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte	9
6. verwendete Fachliteratur und Informations- und Dokumentationsdienste	9
7. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
III. Eingehende Darstellung	11
1. Arbeitsinhalte und erzielte Ergebnisse	11
AP 1.4: Datenmanagement	11
AP 2.1: Range-Extender-Betriebsstrategien	40
AP 3.1: Fahrstrategie	63
AP 3.3: Mensch-Maschine-Interface.....	73
2. Nutzen der Ergebnisse	81
3. Fortschritt bei anderen Stellen	82
4. Veröffentlichungen und studentische Arbeiten	83
Vorträge.....	83
Publikationen	83
Studentische Arbeiten	84
IV. Literaturverzeichnis.....	86

I. Versionsübersicht

Version	Datum	Änderungsgrund	Bearbeiter
0.1	30.09.2014	Darstellung der Projektinhalte	M. Krumnow
0.2	05.11.2014	Ergänzungen der Inhalte nach „Hinweisblatt zum Schlussbericht Teilvorhaben“	S. Uebel
0.3	20.11.2014	Ergänzung der Kapitel II.3, II.4, II.5, III.2 und III.3.	S. Uebel
0.4	03.12.2014	Finalisierung	S. Uebel / T. Schubert

II. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

AP 1.4

Es sollen Verfahren untersucht und ggf. konzipiert werden, mit denen eine Aussage über die Rückstaulänge, an den durch LSA geregelten Knotenpunkten, ermöglicht wird.

Maßgebend dabei sind die verfügbaren Daten, die innerhalb des operativen Verkehrsmanagementsystems der Stadt Dresden zur Verfügung stehen. Dazu zählen Daten der Detektionstechnik, sowie Floating Car Data (FCD) von ca. 500 Taxis. Neben der Position des realen Haltepunktes, soll auch eine Angabe zur tatsächlichen Haltedauer gemacht werden.

Die Ergebnisse der Spezifikation aus Arbeitspaket 1.4.2 sollen in das operative Verkehrsmanagementsystem der Landeshauptstadt Dresden (VAMOS) integriert werden. Bei der Bearbeitung wird die Datenschnittstelle implementiert und die Funktionsfähigkeit sichergestellt.

Anhand einer Verifikationsstrecke in der Landeshauptstadt Dresden, soll die Qualität der einzelnen Komponenten des Systems geprüft und kalibriert werden.

Ein weiteres Ziel dieses APs ist die Bestimmung und/Ausrüstung einer Test- und Verifikationsstrecke für den gesamten Kommunikationskreislauf zwischen Service-Provider und Fahrzeug. Anhand von praktischen Versuchsdurchführungen ist die Funktionalität des LSA-Annäherungsassistenten zu prüfen und zu validieren.

AP 2.1

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden Funktionen spezifiziert, die auf Basis der in AP1.1, AP1.2 und AP1.5 entworfenen Prognoseverfahren den Energiehaushalt von reinen Elektrofahrzeugen und Elektrofahrzeugen mit Range-Extender (REX) vorausschauend regeln können. Die vorausschauende Regelung betrifft einerseits das Zu- und Abschalten des Range-Extenders, andererseits die zu wählende Ladeleistung des integrierten Generators. Durch geschicktes Wählen der Zeitpunkte und Leistungen der Aggregate kann die rein elektrische Reichweite des Fahrzeugs deutlich gesteigert bzw. die Effizienz prozentual angehoben werden.

In Fahrzeugen mit signifikanter elektrischer Reichweite muss die Vorausschau dafür auf einen Bereich >10km ausgedehnt werden, da die gespeicherte elektrische Energie vor allem auf längeren Strecken effizienter eingesetzt werden kann. Um eine effiziente Betriebsführung zu bewerkstelligen, muss die gesamte Route bis zum Fahrtziel herangezogen werden bzw. ohne aktivierter Zielführung durch intelligente Algorithmen auf das Nutzungsprofil des Fahrzeugs geschlossen werden.

Das Ziel ist die optimale Nutzung der gespeicherten elektrischen Energie bis zum nächsten Ladevorgang. Hierfür wird die Betriebsstrategie von Antriebsstrang, Bordnetz und Ladevorgang in Abhängigkeit der Fahrprofilprognose und der Informationen zu Zeit und Ort des

nächsten Ladevorgangs optimiert. Die vorausschauenden Betriebsstrategien berücksichtigen dabei auch die zu erwartenden Emissionen des Range Extender Aggregats in Abhängigkeit der Häufigkeit seiner Starts- bzw. Abschaltvorgänge.

AP 3.1

Im Rahmen des Arbeitspakets 3.1 werden Funktionen erarbeitet und spezifiziert, die den Fahrer bei einer vorausschauenden und effizienten Fahrweise unterstützen sollen. Neben konstruktiven Eigenschaften des Fahrzeugs (wie z.B. Masse, cW-Wert, Antriebsstrangkonfiguration) beeinflusst die Fahrweise den Kraftstoffverbrauch und die Emissionswerte des Fahrzeugs in hohem Maße. Die Fahrweise ist dabei geprägt von einem individuellen Beschleunigungs- und Bremsverhalten sowie einem situationsabhängigen Gangwahl-Verhalten. Bei konventionellen Fahrzeugen mit Schaltgetriebe können Verbrauchsabweichungen von bis zu 20% vom Mittelwert durch fahrerspezifisches Bedienverhalten nachgewiesen werden.

AP 3.3

Sämtliche Maßnahmen der Fahrzeuginfrastruktur zur Minimierung des Energieverbrauchs können durch eine ungeeignete Fahrweise des Fahrers wieder zunichte gemacht werden. Durch gezielte Hinweise und konkrete Anweisungen an den Fahrer ist es dagegen möglich, die Effizienz des Gesamtsystems Fahrzeug weiter zu optimieren.

Dieses Arbeitspaket umfasst die Untersuchung neuartiger Ansätze zur besseren und anschaulicheren Präsentation der notwendigen Informationen an den Fahrer und beinhaltet neben konventionellen Anzeigen auch die Themen Augmented Reality und aktives Fahrpedal. Gleichzeitig werden konventionelle Ansätze zur Anzeige und anderweitiger Vermittlung der notwendigen Information entworfen und umgesetzt, damit frühzeitig eine geeignete Präsentationsplattform in den Versuchsträgern bereitgestellt werden kann. Als Bewertungsmethode werden Nutzerstudien angewendet, wobei daraus gewonnene Erkenntnisse in eine energetische Fahrzeugsimulation einfließen, mit der die Anzeigeeinstrumente mit der größten Akzeptanz sowie der größtmöglichen Energieeinsparwirkung ermittelt werden. Als Basis für die angezeigten Fahrhinweise dienen die aus den Arbeitspaketen 1 und 2 hervorgehenden Informationen.

2. Voraussetzungen

Am Institut für Automobiltechnik Dresden (Prof. Bäker, Prof. Prokop, Prof. Zellbeck) werden Untersuchungen zur Entwicklung von effizienzsteigernden Betriebs- und Fahrstrategien durchgeführt. Im Bereich Fahrzeugmechatronik werden Methoden und Ansätze zur Optimierung des Energiemanagement-Systems und der hybrid-elektrischen Antriebsstrangregelung des Fahrzeugs entwickelt; die Bereiche Verbrennungsmotoren und Fahrzeugtechnik betrachten und optimieren einzelne Komponentensysteme des konventionellen Antriebsstranges und beschäftigen sich mit der Systemgestaltung und -evaluierung der Interaktion von Fahrer und Gesamtfahrzeug.

Am Institut für Verkehrstelematik (Prof. Krimmling, Prof. Michler) werden Kommunikations- und Informationstechnologien im Bereich des Verkehrs erforscht. Darunter zählen drahtlose Übertragungsverfahren genauso wie die Frage der sicheren und präzisen Ortung. Am Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung wird das operative städtische Verkehrsmanagementsystem VAMOS entwickelt. Hier laufen eine Vielzahl an Verkehrsdaten ein, welche durch intelligente Verfahren fusioniert werden und eine aktuelle Verkehrslage wiedergeben. In der Konsequenz werden Schaltempfehlungen gegeben bzw. direkt ausgelöst. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen stellen dabei Lichtsignalanlagen dar, da diese den Verkehr innerhalb von Großstädten signifikant beeinflussen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und der Ablauf des Vorhabens gliederten sich in die im Projektantrag genannten Teilarbeitspakete. In den von der TU Dresden bearbeiteten Arbeitspaketen kam es zu keinen größeren Verschiebungen.

AP 1.4

Aufgrund der verspäteten Installation der Verkehrskameras verzögerte sich die Verifikationsphase der Rückstapuprognose. Durch die kostenneutrale Laufzeitverlängerung konnte aber auch diese zufriedenstellend durchgeführt werden.

AP 2.1

Die Abarbeitung fand, wie geplant in 48 Mannmonaten statt. Kleinere Verzögerungen verursachte ein Defekt am Prüfstand, die aber im Laufe der Projektlaufzeit wieder aufgeholt werden konnten.

AP 3.1

Das in AP 3.1.5 eingeplante kommerzielle Tool VISSIM der Firma PTV Group zur Verkehrssimulation wurde durch eine Eigenentwicklung ersetzt. Gründe dafür waren zum einen die gute Performance von SUMO und der geringe Implementierungsaufwand für einzelne Teilstrecken. Außerdem bietet die Verwendung von SUMO ein erhöhtes Verwertungspotential der Ergebnisse, da es sich um Open Source, also eine freie Software handelt, welche ständig weiterentwickelt wird, und welche im Hinblick auf die Verwendung in Lehre und Forschung eine sehr gute Position einnimmt.

Zeitliche Verschiebungen gab es in AP 3.1.6 bei der Implementierung im Versuchsträger, da sich die Bereitstellung des Versuchsträgers verzögerte. Im Allgemeinen wurde die Planung jedoch eingehalten.

AP 3.3

Das Vorhaben wurde in sieben Teilarbeitspakete unterteilt. Von diesen Teilarbeitspaketen wurden vier an der TU-Dresden und drei in Zusammenarbeit mit industriellen Projektpartnern bearbeitet. Es kam zu geringfügigen zeitlichen Verschiebungen, welche jedoch wäh-

rend der Projektlaufzeit kompensiert wurden. Durch die späte Verfügbarkeit der Verifikationsmöglichkeiten bezüglich der Rückstauprognose konnte eine Verifikation anhand einer umfangreichen Probandenstudie nicht in der Form umgesetzt werden wie zu Projektbeginn geplant. Die Projektziele wurden jedoch dennoch erreicht.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

AP 1.4

Zu Projektstart existierten im Bereich der Prädiktion von Schaltzeiten verkehrsadaptiver Lichtsignalanlagen nur rudimentäre Lösungen (EMM11).

Daher war es notwendig ein allgemeingültiges Konzept zu erarbeiten was zum einen möglichst genau arbeitet zum anderen aber auch gut übertragbar auch auf andere Städte ist. Die Herausforderung ergibt sich somit, keine herstellerspezifischen Lösungen zu fokussieren, sondern möglichst ein allgemeingültiges Verfahren zu entwickeln.

In den verwendeten Literaturquellen ließ sich ein solches Verfahren nicht finden.

Auf dem Gebiet der Rückstaulängenschätzung existieren zahlreichen Verfahren (Mue02, Wu96), jedoch in Kombination mit einer nur prognostizierten LSA Schaltzeit ist auch hier der Einsatz bestehender Verfahren zu prüfen.

AP 2.1

Die Aktivitäten vor Projektstart auf dem Gebiet „Vorausschau“ konzentrierten sich vorrangig auf die Nutzung von singulären Sensordaten für Hybridfahrzeuge. Die explizite Vernetzung bzw. Fusion einzelner Sensordaten zu einem Prädiktionshorizont für Elektrofahrzeuge, aber auch für Fahrzeuge mit verbrennungsmotorischem Range-Extender, sollte erst in diesem Teilvorhaben erarbeitet werden.

Aus der Vorab-Literaturrecherche ließ sich schließen, dass bisherige prädiktive Betriebsstrategien für hybride Antriebsstränge (parallel, seriell und leistungsverzweigt) nur für kurze rein-elektrische Reichweiten untersucht wurden. Ansätze basieren entweder auf Regeln [Wil09, Gru10] oder auf einer Online-Optimierung [Kut10, Ser09, Joh09]. Die Online-Optimierungen stützen sich dabei auf einem berechneten Kraftstoff-Batterie-Energiekostenäquivalent. Die Bestimmung des maximal möglichen Einsparpotenzials hybrider Antriebsstränge basierte in der Literatur zumeist auf dem Verfahren der Dynamischen Programmierung (DP) [Bac05, Cas08, Joh09, Kes07, Sti08]. Dieses kann jedoch nicht echtzeitfähig im Fahrzeug implementiert werden und ist extrem abhängig von einer bis zu 100% zutreffenden Prognose des Fahrverlaufs [Cas08, Joh09, BS11].

Die im Stand der Technik zu findenden Ansätze beschränken sich bei der Optimierung auf den Parameter Kraftstoff- bzw. Gesamtenergieverbrauch in Parallelhybriden. In diesem Teilvorhaben lag der Fokus hingegen auf der Reichenweitenverlängerung und der Emissionsreduzierung eines Elektrofahrzeugs mit Range-Extender. Es mussten deshalb speziell auf diesen Fokus zugeschnittene Methoden untersucht werden.

AP 3.1

Ampelassistenzsysteme wurden im Vorfeld des Projektes nur für sehr einfache Verkehrsszenarien analysiert. Zudem sind in vielen Fällen Vereinfachungen getroffen worden. Die erarbeitete Simulationsumgebung, welche SUMO mit MATLAB koppelt ist neuartig. Die Simulationsumgebung schafft enorm viele Möglichkeiten zur Analyse, die bei weitem noch nicht ausgeschöpft werden konnten. Im Bereich der Fahrstrategieempfehlung im Kreuzungsbereich und Ampelassistenz haben sich zahlreiche interessante Ergebnisse herauskristallisiert. So wurde festgestellt, dass ungünstige Konstellationen an LSA zu einem unerwünschten Mehrverbrauch an folgenden LSA führen können.

AP 3.3

Bisherige Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Fahrzeug-Ampel-Kommunikation befassen sich größtenteils mit der Kommunikation sicherer Daten aus festzeitgesteuerten LSA-Knotenpunkten an den Fahrer. Systembedingt ist in dem in EFA2014/2 umgesetzten Verfahren mit einer Unschärfe der Daten im Fahrzeug zu rechnen. Diese wurden als solche dem Fahrer transparent kommuniziert. Dadurch ergibt sich ein neuer Aspekt in Bezug auf das Thema Nutzerakzeptanz des Systems. Die umgesetzte Umgebung zielte auf die Untersuchungen dieses Sachverhalts ab.

5. Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

AP 1.4

Bei der benötigten Schaltzeitprognose verkehrsadaptiver Lichtsignalanlagen sind zu Projektstart keine allgemeinen Verfahren bekannt.

AP 2.1

Im Bereich des Energiemanagements werden in der Industrie, soweit bekannt, heuristische Strategien genutzt. Allerdings sind von keinem Hersteller Patentanmeldungen in dem Bereich bekannt. Bei der benötigten Schaltzeitprognose verkehrsadaptiver Lichtsignalanlagen sind zu Projektstart keine allgemeinen Verfahren bekannt.

AP 3.1

Keine Patente bekannt.

AP 3.3

Bei der Umsetzung der MMI-Untersuchungen wurden keine bekannten Konstruktionen, Verfahren oder Schutzrechte tangiert.

6. verwendete Fachliteratur und Informations- und Dokumentationsdienste

Der Übersichtlichkeit halber ist die verwendete Literatur im Literaturverzeichnis am Ende des Dokuments zusammengestellt.

Zur Recherche nach Literatur und Patenten im Bereich Energiemanagement von Hybridfahrzeugen, wurde der Recherchedienst der Sächsischen Landes- und Universitätsbibliothek (SLUB) beauftragt.

7. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Stadt Dresden

Für die Bereitstellung der verkehrsrelevanten Daten war die Mitarbeit der Stadt Dresden eine Grundvoraussetzung. Die Kommunikation verlief sehr gut und alle Herausforderungen konnten im Laufe des Forschungsprojektes erfolgreich gelöst werden. So waren bereits zu Beginn des F/E-Projektes zahlreiche Verkehrsdaten verfügbar. Durch die aktive Unterstützung des Straßen- und Tiefbauamtes konnten weitere Detektoren (Dauerzählstellen, Kameras) installiert werden, welche auch in weiteren Forschungsverfahren eingesetzt werden können.

BMW AG

Zu Beginn der Projektlaufzeit wurde mit der BMW AG das Arbeitspaket 2.1.1 besprochen, um die Architektur zu bestimmen. Für die Modellierung des Versuchsträgers wurden Daten und Kennfelder durch die BMW AG geliefert. Die Anforderungen an das MMI (AP 3.3.1) wurden in Abstimmung mit der BMW AG definiert.

Metaio GmbH

Die Konzeptentwicklung und Realisierung des AR-Unterstützten Effizienzassistenten (AP 3.3.5 und 3.3.6) erfolgte bei der Firma metaio. Ansätze und Ergebnisse wurden im AP 3.3 zwischen der Firma metaio und der TU-Dresden ausgetauscht.

FZI

Die Verifikation der Fahrweise mit aktivem Fahrpedal erfolgte auf Versuchsträgern und unter Leitung des FZI - Forschungszentrum Informatik. Ergebnisse der Untersuchungen des FZI konnten im Versuchsträger der TU-Dresden demonstriert werden.

III. Eingehende Darstellung

1. Arbeitsinhalte und erzielte Ergebnisse

AP 1.4: Datenmanagement

Dieses Arbeitspaket hatte zum Schwerpunkt die zuverlässige Datenübertragung zwischen Fahrzeug und Infrastruktur. Bei der eingesetzten V2I-Kommunikation wird dabei der zentrale Ansatz verfolgt, d.h. die Übertragung soll nur zwischen Fahrzeug und einem Service-Provider (Backend) stattfinden. Diese Art der Kommunikation wurde daher zunächst spezifiziert und anschließend umgesetzt. Um die zukünftigen Schaltzeiten der Lichtsignalanlagen sowie die damit verbundenen Rückstaulängen übertragen zu können, wurden Prognoseverfahren entwickelt und umgesetzt. Diese Verfahren wurden anhand der Online-Verkehrsdaten des Dresdner Verkehrsmanagementsystems kalibriert und anschließend verifiziert.

AP 1.4.1 Anforderung an die zentralseitige Datenschnittstelle

Für die V2I-Kommunikation ist es zunächst wichtig die verfügbaren Informationen zu benennen und in einem weiteren Schritt zu klassifizieren. Im Falle der Prognose von LSA-Informationen kann man hier in zwei Arten unterscheiden. Zum einen in statische Informationen, welches einmalig zu übertragende Daten sind, und zum anderen in dynamische Informationen, die zeitvariant und damit zyklisch bzw. ereignisorientiert zu übertragen sind.

In diesem Arbeitspaket wurden die notwendigen Elemente identifiziert und entsprechenden Datentypen zugeordnet. Dabei wurde besonders darauf geachtet, möglichst viele Einsatzfälle abdecken zu können. Auch wurden speziell für die Schaltzeitprognose benötigte Datencontainer genannt, welche die Besonderheiten von wahrscheinlichkeitsbasierten Kenngrößen abbilden können. Bei der Prognose des Rückstaus wird zum einen die Länge in Metern, zum anderen die damit verbundene Aufenthaltszeit (Verlustzeit) in Sekunden angegeben [FGS09].

AP 1.4.2 Spezifikation der zentralseitigen Datenschnittstelle

Für die Übertragung der statischen und dynamischen Infrastrukturdaten kommt als Datenaustauschformat das im Verkehrsbereich bereits etablierte Datex II-Protokoll zum Einsatz. Dieses Protokoll wird auch beim bekannten Mobilitätsdatenmarktplatz (MDM) eingesetzt, was zu einer guten Weiternutzung der Datenschnittstelle beitragen wird.

In enger Zusammenarbeit mit der Albrecht Consult GmbH wurde eine neue Level-B-Erweiterung entwickelt, welche die Besonderheiten der Schaltzeit- und der Rückstaulängenprognose abbilden kann. In Abbildung 1 sind die neuen Datencontainer schematisch dargestellt. Jeder dieser XML-Datencontainer ist seinerseits nochmal mit entsprechenden Datenstrukturen (Attributen, Elementen) untersetzt, um die benötigten Informationen speichern zu können.

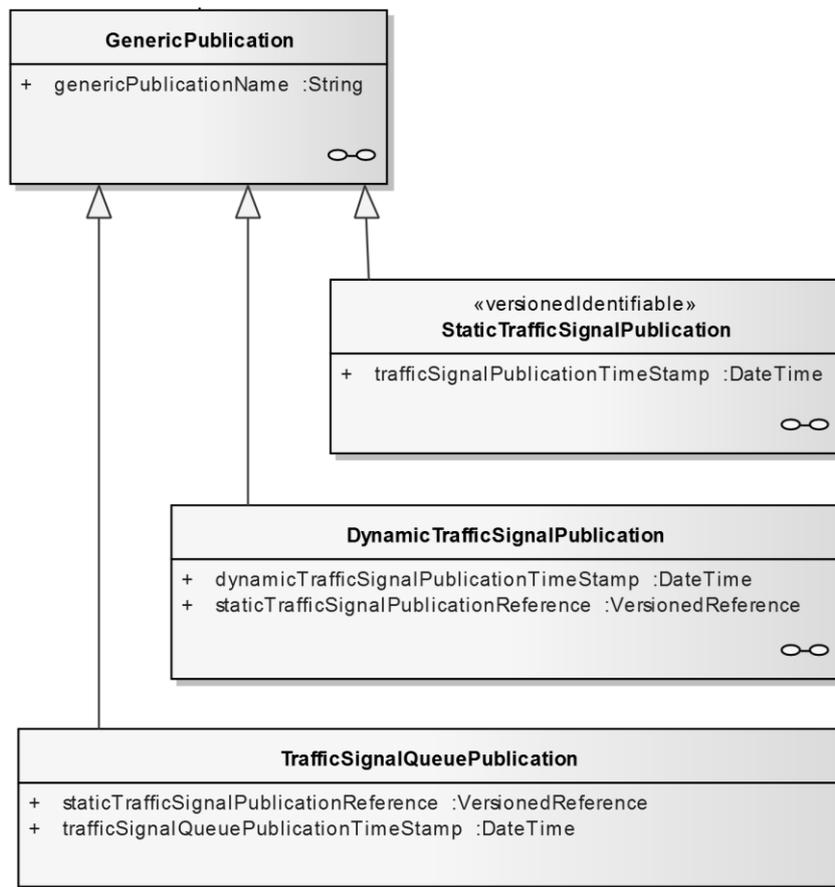


Abbildung 1: Erweiterungen des Level A Standards

Im Datencontainer StaticTrafficSignalPublication werden die statischen Information der Signalgruppen gespeichert. Dazu zählen unter anderem der Name der Signalgruppe (ID) sowie deren Zuordnung zu einem bestimmten Verkehrsstrom (Trafficstream). Der Datencontainer DynamicTrafficSignalPublication beinhaltet die eigentliche Schaltzeitprognose, d.h. den Signalzustand einer Signalgruppe zu einem bestimmten Zeitpunkt inklusive einer Zutreffenswahrscheinlichkeit.

Zur Übertragung der Rückstaulängenprognose kommt der Datencontainer TrafficSignalQueuePublication zum Einsatz, der Informationen zur Rückstaulänge und der damit verbundenen Verlustzeit aufnehmen kann.

Zur Spezifikation der geometrischen Elemente wie Verkehrsstrom oder Haltelinie wurde darauf geachtet, dass mehrere Datenaustauschformate verwendet werden können. So ist eine Unterstützung für das lizenzfreie Modell OpenLR von TomTom eine Grundvoraussetzung für den breiten Einsatz des Protokolls. In Abbildung 2 sind die verschiedenen Möglichkeiten der Definition von Geometrien dargestellt.

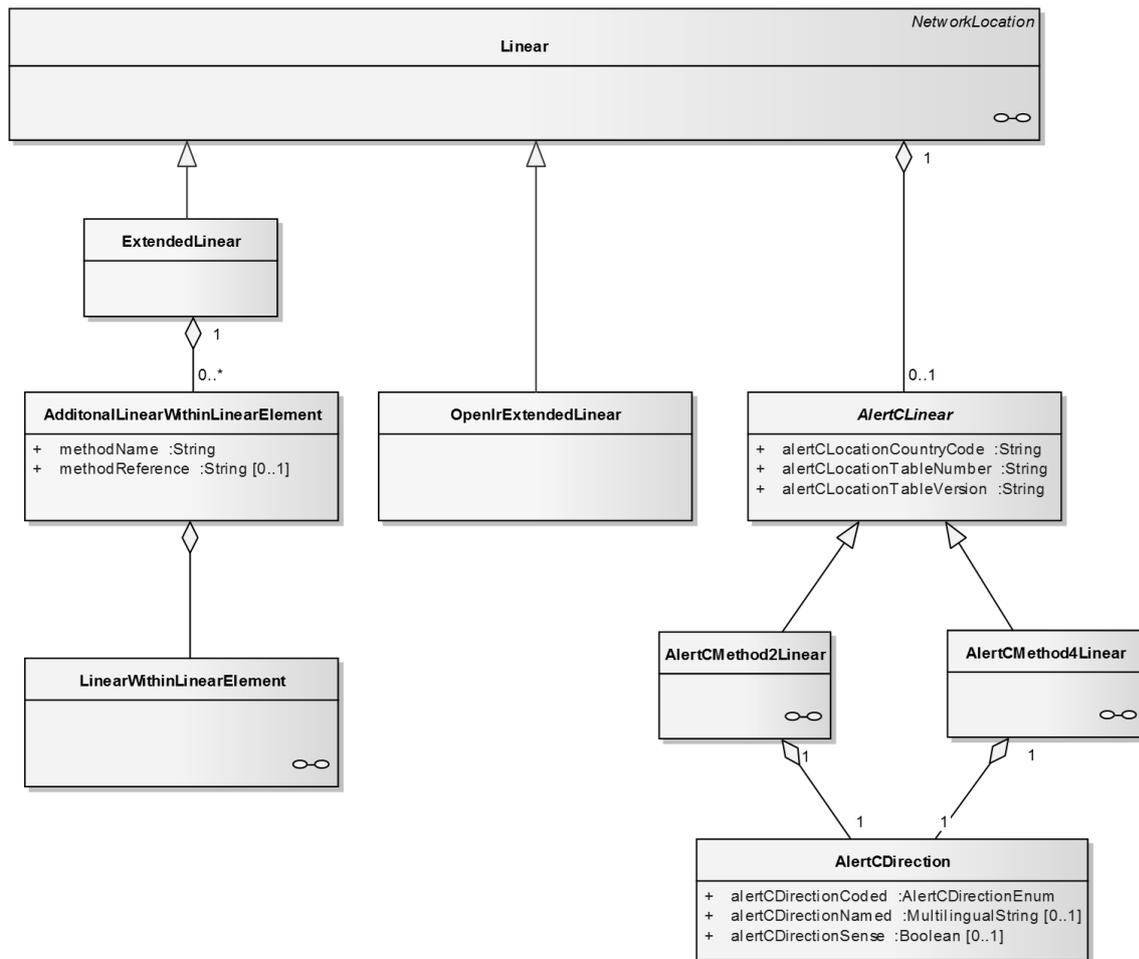


Abbildung 2: Möglichkeiten der Modellierung der geometrischen Elemente

AP 1.4.3 Verfahren der Schaltzeitenprognose

Anforderungen

Das entwickelte Verfahren ermöglicht eine flächendeckende Prognose von Schaltzeiten, wobei die bestehende LSA-Infrastruktur nicht verändert wird.

Eine weitere Anforderung, welche u.a. durch die eingesetzte Kommunikationstechnologie (UMTS/Internet) erforderlich wird, ist der lange Prognosehorizont von über 180 Sekunden in die Zukunft. Hierbei ist anzumerken, dass zuverlässige Prognosen bei verkehrsabhängigen Steuerungen, selbst bei Vorhandensein aller Eingangsgrößen, immer eine große Herausforderung darstellt. [Ble11, Bol89]

Das entsprechende Verfahren erfüllt daher folgende Anforderungen:

- Herstellerunabhängigkeit
- Schnittstellenunabhängigkeit
- Robustheit
- Erweiterbarkeit

Um ein Höchstmaß an Lichtsignalanlagen unterstützen zu können und um unabhängig von Planungsunterlagen zu sein, benutzt die Schaltzeitprognose nur die resultierenden Schalt-daten der Signalgruppen [MOR09]. In Abbildung 3 ist die Einordnung einer solchen Schaltzeitprognose schematisch dargestellt.



Abbildung 3: Das Verfahren nutzt nur die Schaltinformationen der Signalgruppen

Klassifikation von LSA-Steuerungsverfahren

Die Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) unterscheiden bei den Steuerungsverfahren grundsätzlich zwei Ebenen (vgl. [FGS10]). Zum einen die makroskopische Steuerungsebene, welche die zeitliche Veränderung der gewählten Signalprogramme beschreibt. In dieser Ebene wird unterschieden in die Signalprogrammauswahl, welche entweder zeitplan- oder verkehrsabhängig agiert, und in die dynamische Bildung von Rahmensignalprogrammen.

Die lokale Steuerungsebene wird als mikroskopische Steuerungsebene bezeichnet, welche grundlegenden Möglichkeiten der Modellierung von LSA-Steuerprogrammen beschreibt. Dabei wird unterschieden in nicht dynamische Programme (Festzeitsteuerung) und dynamische Programme (Signalprogrammanpassung, Signalprogrammbildung).

Einschränkungen der zu entwickelnden Schaltzeitprognose

In Tabelle 1 und 2 wird bereits eine erste Einschränkung verschiedener Steuerungsverfahren nach RiLSA vorgenommen, welche sich an den zu erwartenden Freiheitsgrad richten [KRU12].

Tabelle 1: Prognose von makroskopischen Steuerungsverfahren

Makroskopische Steuerungsverfahren		Prognose möglich
Signalprogrammauswahl	<ul style="list-style-type: none"> - Zeitplanabhängige Auswahl der Signalprogramme - Verkehrsabhängige Auswahl der Signalprogramme 	ja
Bildung Rahmensignalprogramme	<ul style="list-style-type: none"> - Verkehrsabhängige Bildung der Signalprogramme 	bedingt/nein

Tabelle 2: Prognose von mikroskopischen Steuerverfahren

Mikroskopische Steuerverfahren		Prognose möglich
Festzeitsignalprogramm		ja
Signalprogrammanpassung	<ul style="list-style-type: none"> - Freigabezeitanpassung - Phasentausch - Phasen Anforderung - Versatzzeitanpassung 	ja/bedingt
Signalprogrammabbildung	- Frei Veränderbarkeit	bedingt/nein

Algorithmus für die LSA-Schaltzeitprognose

Um den Anforderungen der Schaltzeitprognose genügen zu können, wie z.B. die gute Übertragbarkeit/Erweiterung des Verfahrens und der Minimierung der benötigten Eingangsdaten, sind verschiedene Annahmen sinnvoll.

Der Signalzustand, der später im Fahrzeug ausgewertet werden soll (probability to go), soll eine Aussage darüber geben, ob gefahren werden darf oder nicht. Daher werden die unterschiedlichen Signalzustände der (KFZ-)Signalgruppen vereinfacht zu Freigabe (grün) und keine Freigabe (rot, gelb, rot/gelb).

Weiterhin erscheint es zweckmäßig, die zeitdiskreten (Sekundentakt) Schaltdaten einer Signalgruppe als binären Vektor darzustellen. Dabei wird allen Zuständen, in denen keine Freigabe für den Strom vorliegt, eine „0“ zugewiesen; den Signalzuständen mit Freigabe eine „1“. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 4 beispielhaft dargestellt.

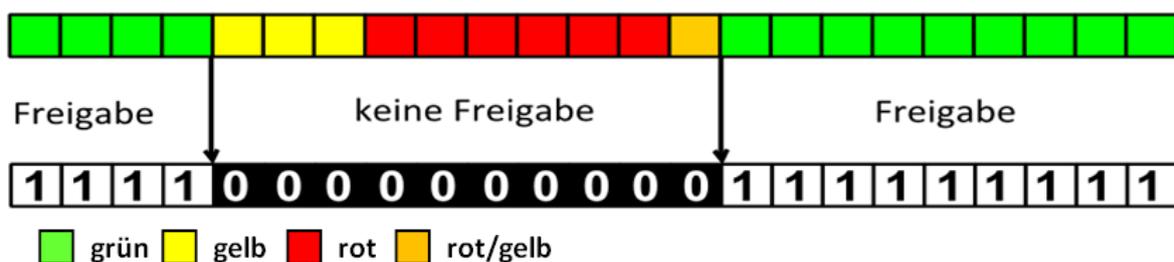


Abbildung 4: Überführung der Signalzustände in Vektoren mit binärer Interpretation

Das Zerlegen der LSA-Schaltdaten in Binärvektoren führt zu einer Reduzierung der Signalzustände. Am Beispiel einer verkehrsabhängigen Steuerung (siehe Abbildung 5) ist zu erkennen, dass die vier Schaltzustände einer KFZ-Signalgruppe, analog des Beispiels in Abbildung 2, alle Umläufe in Binärvektoren überführt werden können.

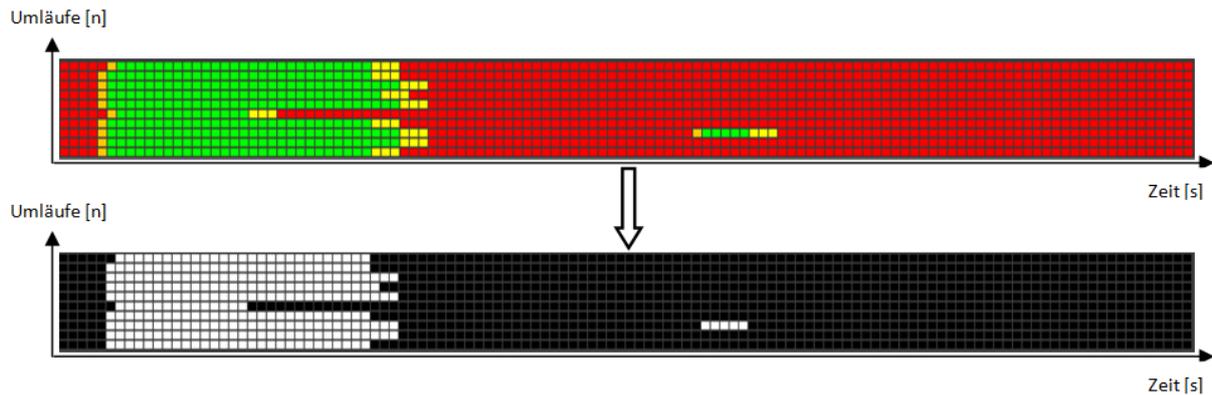


Abbildung 5: Überführung der Signalzustände in Vektoren mit binärer Interpretation

In Abbildung 5 konnte bereits die vom Steuergerät gesendete Umlaufsekunde genutzt werden, um die Umläufe klar voneinander zu unterscheiden.

Eine Prognose über einen längeren Zeitraum, d.h. über mehrere Umläufe, hinweg impliziert entweder eine sehr gute Kenntnisse über das konkrete Steuerverfahren inklusive sämtlicher eintretender Detektordaten oder ist ein hoher Anteil von festen Signalbildern Voraussetzung.

Da die konkrete Kenntnis des Steuerverfahrens nicht Bestandteil dieses Forschungsprojektes ist und eine flächenhafte Anwendung des Prognoseverfahrens so kaum möglich erscheint, ist für eine sichere Aussage (100% Wahrscheinlichkeit des Eintreffens) das Vorhandensein von „Kernzeiten“ eine Grundvoraussetzung (vgl. Abbildung 6). Andere Forschungsprojekte haben dazu bewusst verkehrsabhängige Steuerungen für einen definierten Zeitbereich, z.B. 15 Minuten mit statischen Signalzuständen versorgt, um dieses Kriterium zu erfüllen [FRI11].

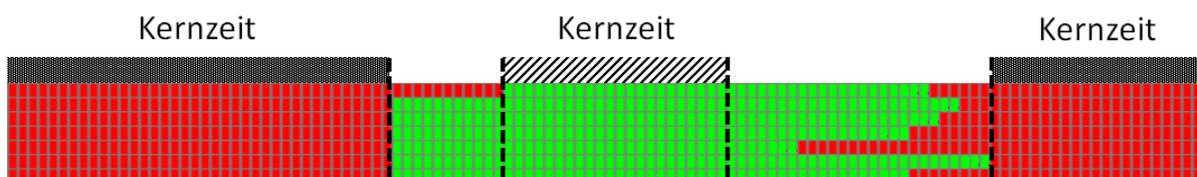


Abbildung 6: Darstellung von Kernzeiten

Das heißt ein gutes Prognoseergebnis kann dann erreicht werden, wenn man es schafft die Periodizität des Umlaufes (Modulo-Operation) so zu wählen, dass möglichst viele Kernzeiten innerhalb des Umlaufes auftreten. Typischerweise ist dies bereits durch die Umlaufzeit des Programmes selbst und den damit verbundenen Rahmenplänen realisiert.

Da dem entwickelnden Prognoseverfahren unter Umständen keine Information zur aktuellen Schaltsekunde des Steuergerätes zur Verfügung steht bzw. die Maximierung der Kernzeiten auch durch dynamische Variation der Umlaufzeit erreicht werden kann, wird im Folgenden ein neuer Ansatz vorgestellt.

Dabei wird durch eine Mustererkennung auf Basis der Autokorrelationsfunktion (AKF) die Umlaufzeit berechnet, welche zu einer Maximierung der Kernzeiten führt [KRU13].

Autokorrelationsanalyse von LSA-Steuerverfahren

Der Verlauf von LSA-Schaltdaten kann als zeitdiskreter Prozess betrachtet werden. Die Kovarianz solcher stochastischen Prozesse (Verteilung der Freigabezeiten) kann dabei mithilfe der Autovarianzfunktion beschrieben werden [SCH01].

Autovarianz

Formel 1:
$$\gamma(t_1, t_2) = E[X_{t_1} - \mu_{t_1})(X_{t_2} - \mu_{t_2})]$$

Für die Erkennung von periodischen Mustern, welche sich zwangsläufig bei umlaufbasierten Steuerverfahren einstellen, kann eine Autokorrelationsfunktion wichtige Aussagen liefern. Dabei steht E für den Erwartungswert und μ_{t_1} für den Erwartungswert von X zum Zeitpunkt.

Autokorrelationsfunktion

Formel 2:
$$\rho(t_1, t_2) = \frac{\gamma(t_1, t_2)}{\sigma_{t_1}\sigma_{t_2}} \quad \text{es gilt } -1 \leq \rho(t_1, t_2) \leq 1$$

Die Faktoren σ_{t_1} und σ_{t_2} beschreiben dabei die Standardabweichung zum jeweiligen Zeitpunkt. Die Besonderheit der AKF besteht darin eine Korrelation des Signals mit sich selbst durchzuführen. Somit können Muster innerhalb des Eingangssignals, welche sich zyklisch wiederholen, sichtbar gemacht werden.

Das Ergebnis der AKF ist normiert für den Bereich -1 bis 1. Im Bereich von Signalprogrammen kann -1 als komplementärer Signalverlauf und +1 als vollkommen identischer Umlauf (z.B. Festzeitsteuerung) interpretiert werden.

Um die Aussagekraft der AKF in Bezug auf LSA-Signalgruppen zu demonstrieren, wurden verschiedene Signalgruppen unterschiedlicher LSA ausgewählt und berechnet. Dabei wurde die Zeitverschiebung (time lag) im Bereich zwischen 40 und 180 Sekunden variiert. Dies erscheint zweckmäßig, da die Umlauflänge in Deutschland in diesem Bereich zu erwarten ist.

Im gewählten Untersuchungszeitraum des 25.02.2013 (Montag) in der Zeit von 06:00 bis 18:00 Uhr wurden die Korrelationskoeffizienten ausgewählter Signalgruppen berechnet. Die Schaltdaten wurden dabei jeweils auf 20 Minuten aggregiert, womit 36 Zeitscheiben pro Signalgruppe verfügbar sind.

Festzeitsteuerungen

Die Korrelationskoeffizienten für den Dresdener Knotenpunkt Columbusstr./Wernerstr. (siehe Abbildung 7) zeigen bei einer vermuteten Umlaufdauer von 60 Sekunden (time lag) ein lokales Maximum an. Dies deutet darauf hin, dass sich das Signalmuster periodisch wiederholt. Dies wird auch aus den weiteren lokalen Maxima bei 120 und 180 Sekunden ersichtlich, welche einem Vielfachen der prognostizierten Umlaufdauer entsprechen.

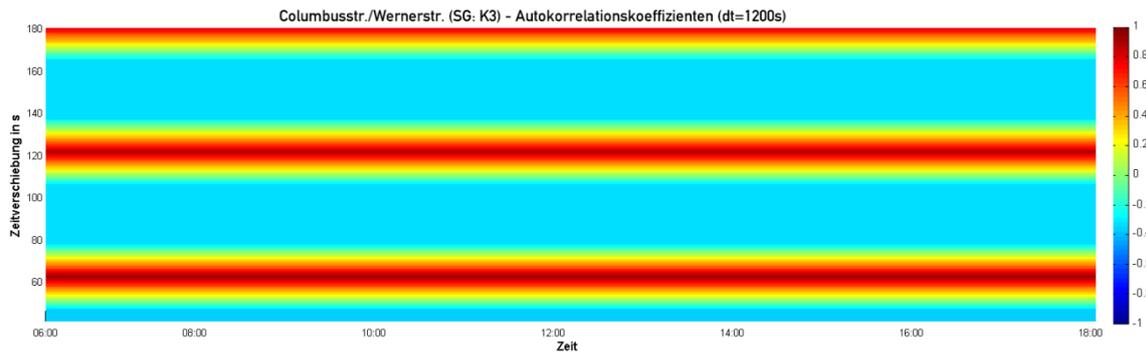


Abbildung 7: Autokorrelationskoeffizienten für den Zeitraum 25.02.2013 – 6 bis 18 Uhr

Weiterhin kann festgestellt werden, dass es keinen Programmwechsel innerhalb des Untersuchungszeitraumes gab, da sich weder die geschätzte Umlaufdauer noch die Muster signifikant verändert haben. Eine Überprüfung mit den Steuerungsdaten dieser LSA konnte diese Vermutung bestätigen.

Eine hervorragende Prognostizierbarkeit derartiger Signalverläufe ist zu erwarten.

Teilverkehrsabhängige Steuerungen

Am Dresdener Knotenpunkt Nürnberger Platz läuft derzeit eine verkehrsabhängige Steuerung auf Basis des Steuerverfahrens VS-Plus und einer starken ÖPNV-Beeinflussung. Die Autokorrelationskoeffizienten spiegeln dieses Verhalten der Anlage gut wieder. In Abbildung 6 kann man deutlich erkennen, dass verschiedene Programmwechsel stattgefunden haben (z.B. 08:30 Uhr und 15:30 Uhr), womit die makroskopische Steuerungsebene gemäß RiLSA bereits beschrieben werden kann.

Weiterhin kann man innerhalb der einzelnen Programme erkennen, dass das lokale Maximum nicht mehr so klar ausgeprägt ist wie bei der vorangegangenen Festzeitsteuerung. Dies deutet darauf hin, dass es in der mikroskopischen Steuerungsebene zu Signalprogrammanpassungen gekommen ist. Diese Anpassungen sind allerdings nicht sehr stark ausgeprägt, da ein Bereich des lokalen Maximums deutlich erkennbar ist, z.B. im Bereich von 120 Sekunden.

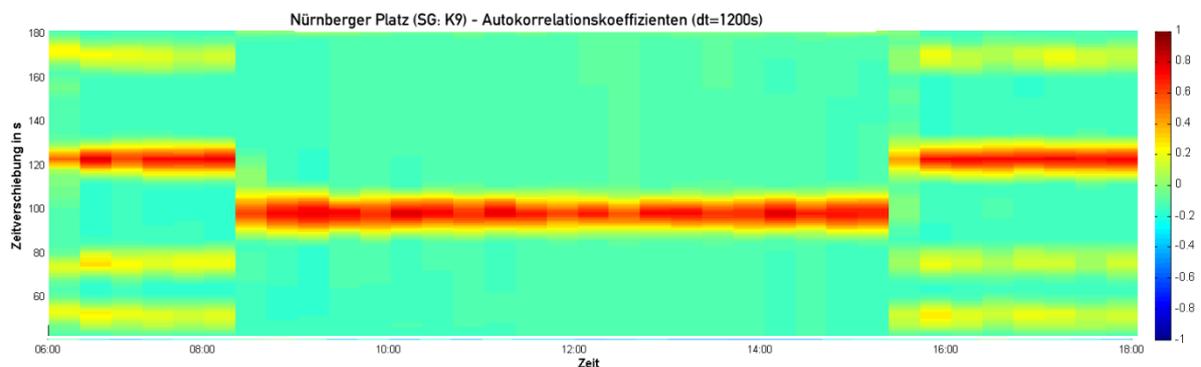


Abbildung 8: Autokorrelationskoeffizienten für den Zeitraum 25.02.2013 – 06 bis 18 Uhr

Die verkehrstechnischen Unterlagen (VTU) belegen diese Annahmen. Diese Anlage unterliegt zum einen der zeitplanabhängigen Signalprogrammwahl, zum anderen kommt es innerhalb des LSA-Steuerverfahrens zu Freigabezeitanpassungen und Sonderphasenanforderungen durch den ÖPNV.

Eine Schaltzeitprognose größer 180 Sekunden erscheint bei diesem Steuerverfahren sinnvoll.

Vollverkehrsabhängige Steuerungen

In Abbildung 9 sind die Autokorrelationskoeffizienten für den Dresdener Knotenpunkt Wasaplatz dargestellt. Im Vergleich zu den zuvor dargestellten Steuerungen, handelt es sich bei diesem Knoten um einen sogenannten „Freiläufer“, d.h. diese LSA befindet sich weder in einer Koordinierung noch sind feste Rahmenpläne für die Umläufe definiert. Dieser Sachverhalt wird durch die berechneten Korrelationskoeffizienten deutlich dargestellt. In diesem Falle kann ein eindeutiges Maximum nicht erkannt werden. Auch ändert sich die geschätzte Umlaufdauer für jeden einzelnen Zeitbereich.

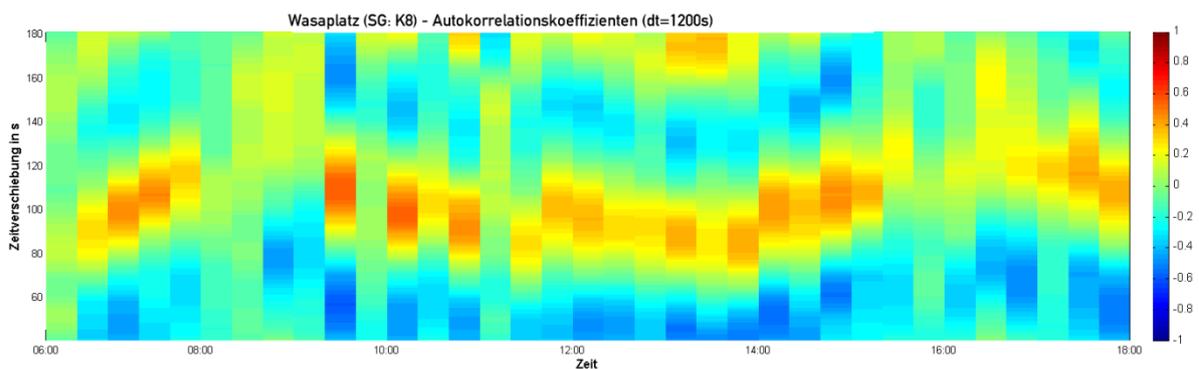


Abbildung 9: Autokorrelationskoeffizienten für den Zeitraum 25.02.2013 – 06 bis 18 Uhr

Schaltzeitprognosen, die über mehrere Sekunden hinausgehen, sind ohne zusätzliche Informationen kaum möglich.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Autokorrelationsanalyse einen guten Beitrag leisten kann zur Einschätzung der erzielbaren Prognosequalität für unterschiedliche Signalgruppen. Weiterhin kann die Umlauflänge bestimmt werden, bei der eine Maximierung der Kernzeit eintritt. Dieses Verfahren ist daher in der Lage, die Umlauflänge sowie die Umlaufsekunde zu berechnen, womit diese Information vom Steuergerät nicht mehr benötigt wird.

Auf Basis dieser Betrachtungen soll nun ein Online-Verfahren vorgestellt werden, welches basierend auf aktuellen LSA-Schaltdaten eine Prognose der zu erwartenden Signalzustände zulässt.

Schaltzeitprognose auf Basis historischer Schaltdaten

Es wurde ein Algorithmus für die Schaltzeitprognose entwickelt, welcher einen Basisvektor berechnen kann, der die Wahrscheinlichkeiten für eine Freigabe für jede Umlaufsekunde beinhaltet [KRU12]. Dieser Basisvektor wird gebildet, indem die Umläufe von mehreren Tagen analysiert werden. Dabei wird registriert wie oft und in welcher Umlaufsekunde der Zustand der Freigabe vorhanden war, um daraus die Wahrscheinlichkeiten zu berechnen. Dadurch lässt sich die Steuerungsart und die dazugehörigen Parameter wie Kernzeiten, Mindestgrünzeit oder Maximalgrünzeit ermitteln. Für jede Signalgruppe und für jedes Programm wird solch ein Basisvektor erstellt [PAP10].

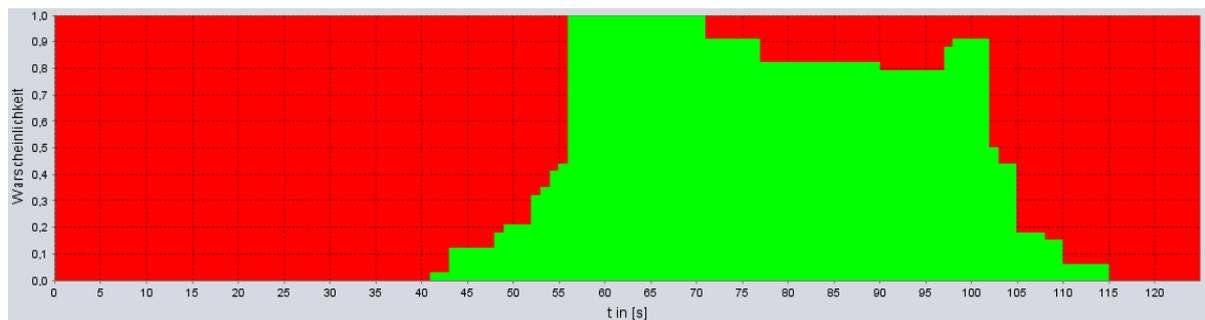


Abbildung 10: Basisvektor Signalgruppe K1/K2 (Nürnberger Platz/Dresden)

Für die eigentliche Prognose wird dieser Basisvektor zu Grunde gelegt und mit Hilfe aktueller Schaltdaten optimiert. Ein weiterer Ansatz besteht darin, die letzten Umläufe einer Signalgruppe zu analysieren und die Wahrscheinlichkeiten innerhalb des Rahmens entweder zu erhöhen oder zu verringern. Damit soll der Bereich, innerhalb dessen die Freigabe geschaltet werden kann, verringert werden. Prognosen können somit über mehrere Minuten oder sogar Stunden erstellt werden, nimmt man als Nutzinformation nur die Kernzeiten. Mit Hilfe der Zeiten für die Wochenautomatik sind auch Programmwechsel in der Prognose berücksichtigt. Um die Auswahl des richtigen Basisvektors abzusichern, werden die Umläufe permanent mit dem Basisvektor abgeglichen. Auf diese Weise kann geprüft werden, in welchem Programm sich die Lichtsignalanlage gerade befindet. Somit kann auch auf die verkehrsabhängige Signalprogrammauswahl reagiert werden, die jederzeit die Möglichkeit hat, die Programme an das aktuelle Verkehrsgeschehen anzupassen. Sollte kein Basisvektor hinterlegt sein, so kann das Verfahren aus den letzten Umläufen einen Basisvektor selbst erstellen und diesen als Grundlage nehmen [PAP12]. Anschließend wird jeder Prognosevektor mit den realen Schaltdaten verglichen und eine Güte für die Genauigkeit ermittelt. Dabei wird durch einen Schwellenwert aus dem Prognosevektor mit den Wahrscheinlichkeiten ein Binärvektor erstellt. Somit gibt die Güte an, wie viele Sekunden richtig prognostiziert wurden. Dieser Wert wird dem nächsten Prognosevektor übermittelt und dient als momentane Prognosequalität. Ebenfalls kann eine Verfügbarkeit angegeben werden, die aussagt, wie viele Umlaufsekunden mit den jeweiligen Wahrscheinlichkeiten über oder unter einem angegebenen Schwellenwert liegen (z.B. über 95% und unter 5%). Je größer die Verfügbarkeit, desto kleiner der Rahmen, in dem die Prognose nicht genau be-

stimmt werden kann. Der Prognosealgorithmus wurde als Softwaredienst ausgebildet, welcher permanent Schaltzeitprognosen liefern kann. In Abbildung 11 ist beispielhaft ein so erstellter Prognosevektor zusammen mit den realen Schaltdaten dargestellt.

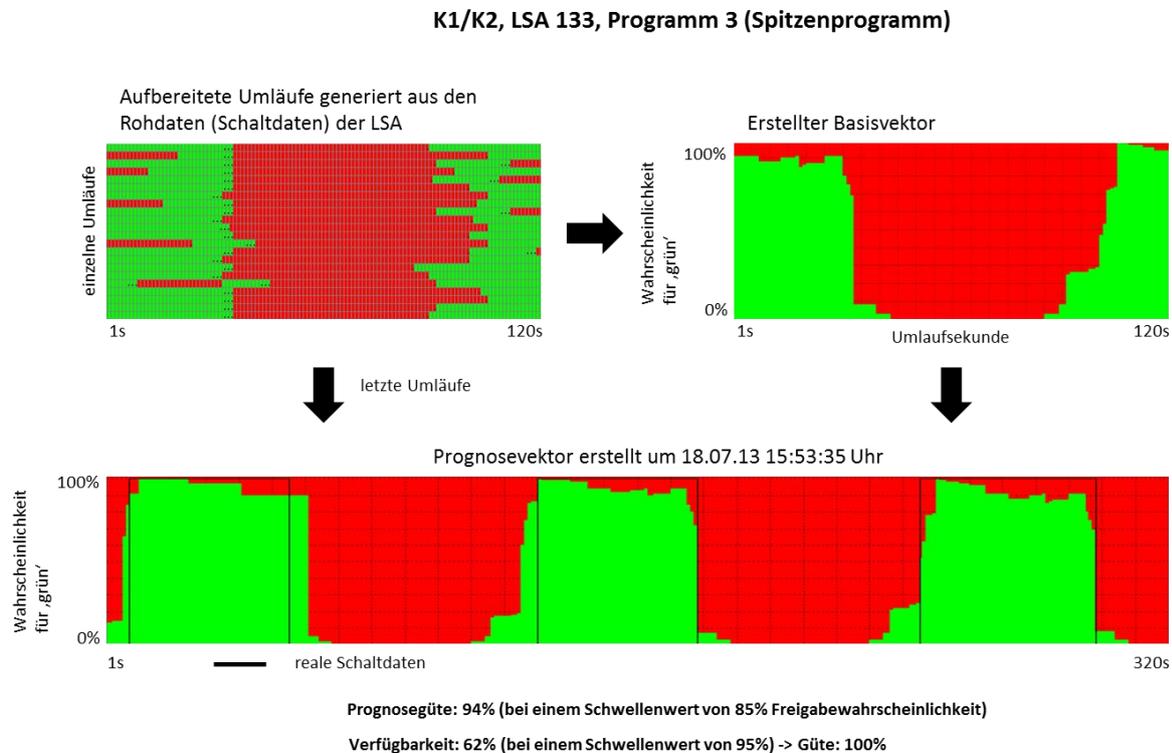


Abbildung 11: Vergleich zwischen Prognosevektor und realen Schaltdaten

Einsatz weiterer Informationsquellen

An vielen Lichtsignalanlagen bei den ÖPNV-Verkehrsströme involviert sind, wird auf das Mittel der Priorisierung zurückgegriffen. So sollen die Warte- und Verlustzeiten für diese Verkehrsmittel minimiert werden. Realisiert wird diese Priorisierung meist auf mikroskopischer Steuerungsebene (vgl. [FGS10]). So wird durch Freigabezeitanpassung, d.h. durch Stauchung bzw. Dehnung einzelner Phasen, durch Phasenverschiebung oder Phaseneinschub, die Verkehrsqualität zu Gunsten des ÖPNV beeinflusst. Durch verschiedene Informationen, u.a. über die ÖPNV-Verkehrslage, können solche Eingriffe in den „normalen“ Programmablauf bei der Prognose berücksichtigt werden. Wichtig hierbei ist die genaue Ankunftszeit der Fahrzeuge an der LSA, an welcher Signalgruppe sie sich anmelden und welche Freigabefenster für das ÖPNV-Fahrzeug zur Verfügung stehen. An einigen Anlagen ist sogar die Fahrplanlage von Bedeutung, da Verfrühungen oder Verspätungen berücksichtigt werden können. Auch ist an einigen Anlagen die Möglichkeit der Anschlusssicherung vorgesehen (vgl. [Gas13]).

Durch eine Vielzahl weiterer Randbedingungen (zukünftige Verkehrsstärken etc.), die ebenfalls Einfluss auf die Schaltzeiten der einzelnen Phasen haben, kann die Prognosegüte durch die ÖPNV-Informationen nur bedingt verbessert oder sogar verringert werden. Daher

ist eine hohe Qualität der ÖPNV-Ankunftsprognose entscheidend für die Qualität der Schaltzeitprognose.

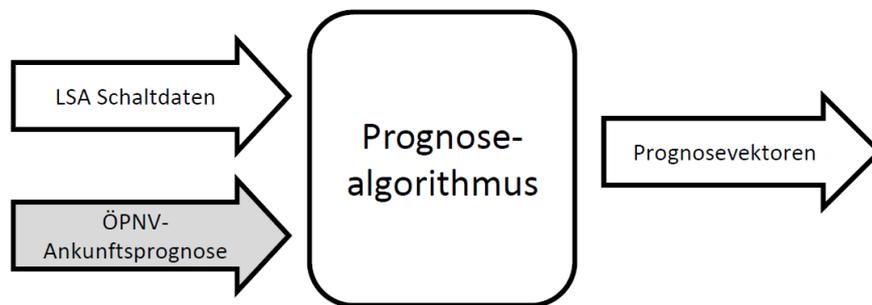


Abbildung 12: Erweiterung des generischen Algorithmus um Daten des ÖPNV

Für die Verarbeitung dieser Zusatzinformationen wurde der Prognosealgorithmus so erweitert, dass durch Eingabe der Ankunftszeit des ÖPNV-Fahrzeugs an der Signalgruppe die Priorisierung auch berücksichtigt wird (siehe Abbildung 12). Auf Basis der zuvor berechneten Basisvektoren lassen sich nahezu alle möglichen Freigabefenster ermitteln. Darüber hinaus wurden die kausalen Zusammenhänge der zueinander feindlichen bzw. verträglichen Signalgruppen ermittelt. Dies ist bei der Betrachtung von ÖPNV-Priorisierung von besonderer Bedeutung, da Abhängigkeiten zum MIV so berücksichtigt werden können.

Abbildung 13 zeigt die speziellen Freigabefenster einer KFZ-Signalgruppe, die parallel zu einer verträglichen ÖPNV-Signalgruppe geschaltet wurde. Die geringe Freigabewahrscheinlichkeit innerhalb dieser Bereiche macht deutlich, dass diese Freigabezeiten nicht häufig genutzt werden und sehr wahrscheinlich nur durch den ÖPNV angefordert werden.

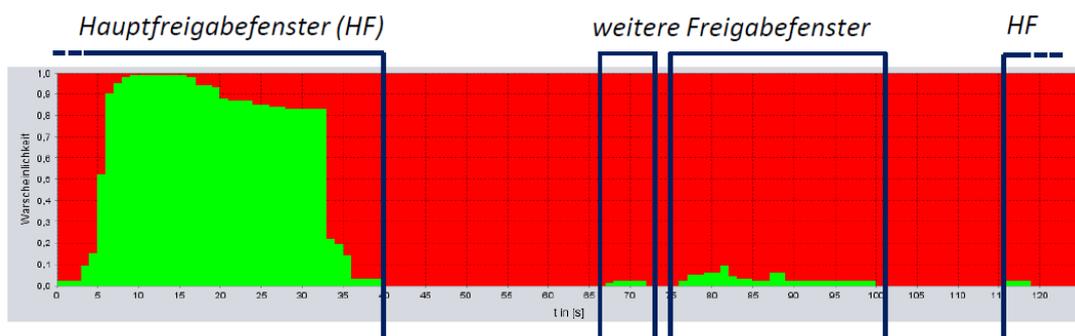


Abbildung 13: Basisvektor mit zusätzlicher Phase für den ÖPNV

Wie der Prognosevektor konkret aussieht, wenn keine ÖPNV-Informationen zur Verfügung stehen, zeigt Abbildung 14. Dabei repräsentiert die schwarze Linie die tatsächliche Schaltung der Signalgruppe. Ein Wert von eins bedeutet, die Signalgruppe zeigt grün; gibt der Wert null an, wird etwas anderes (rot, gelb, rot/gelb) geschaltet. Im Bereich zwischen 125 und 130 Sekunden kann man erkennen, dass ein extra Freigabefenster geschaltet wurde, dass bei der Prognose nicht berücksichtigt wurde.

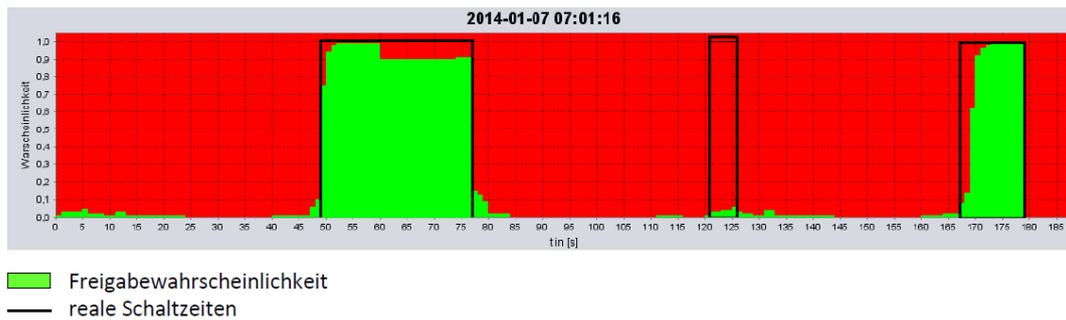


Abbildung 14: Vergleich Prognosevektor mit realen Schaltdaten

In Abbildung 15 sind die ÖPNV-Ankunftszeiten bekannt. Das erste Fahrzeug ist feindlich zur gegebenen Signalgruppe, wodurch die Freigabezeit zu Gunsten des ÖPNVs gestauch wird. Dies konnte in der Prognose berücksichtigt werden und wurde korrekt prognostiziert. Hierbei konnte die Prognosegüte verbessert werden. Beim zweiten Fahrzeug (ganz rechts) handelt es sich um ein verträgliches Fahrzeug wodurch die Nutzung des extra Freigabefensters prognostiziert wurde. Durch eine ungenaue Ankunftszeitprognose des Fahrzeugs wurde das Freigabefenster jedoch nicht geschaltet und es kam zu einer falschen Prognose. Als Resultat auf diesen Sachverhalt wurde die Prognosegüte des Prognosevektors angepasst.

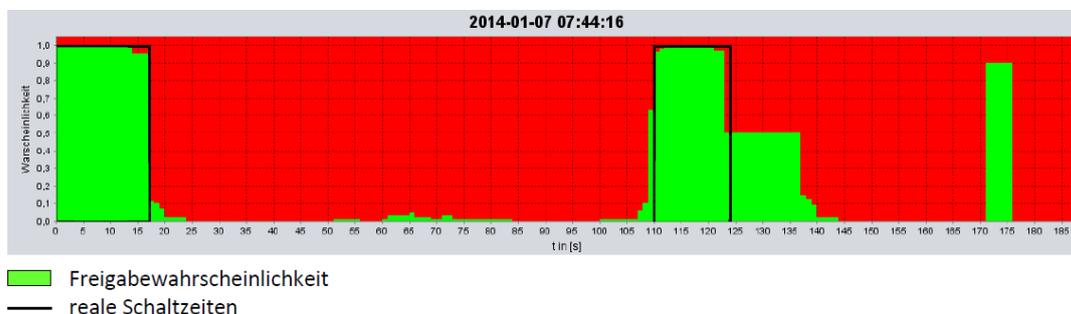


Abbildung 15: Vergleich Prognosevektor mit realen Schaltdaten

AP 1.4.4 Verfahren zur Prognose der Haltepunkte und Haltedauer

Für die Ermittlung einer optimalen Anfahrstrategie an eine Lichtsignalanlage sind neben den Schaltzeiten ebenso Rückstaulängen von Bedeutung. Anhand derer lässt sich zum einen auf den konkreten Haltepunkt sowie die Haltedauer schließen. Der Haltepunkt würde sich bei Vernachlässigung des Rückstaus stets an der Haltelinie der Lichtsignalanlage befinden, was jedoch nicht der Realität entspricht. Bedingt durch vorausfahrende Verkehrsteilnehmer ist es nicht möglich, zu jedem Zeitpunkt bis zur Haltelinie vorzufahren. Aus diesem Grund ist es wichtig, das Ende des Rückstaus und damit den konkreten Haltepunkt zu kennen, um den tatsächlichen Anfahrweg ermitteln zu können. Die Haltedauer setzt sich aus der verbleibenden Sperrzeit und der zusätzlichen Wartezeit zusammen, die durch den

Abbau des Rückstaus entsteht. Im Idealfall sind für die Bestimmung der zusätzlichen Wartezeit die Rückstaulänge und die Abflussgeschwindigkeiten der vorausfahrenden Fahrzeuge bekannt. Aufgrund des Wissens über Schaltzeiten und Rückstaulängen kann dem Fahrer eine optimale Anfahrstrategie übermittelt werden. Die Geschwindigkeitsempfehlung ist dabei direkt von der aktuellen Rückstaulänge abhängig. So sinkt die Geschwindigkeit, je länger der Rückstau ist.

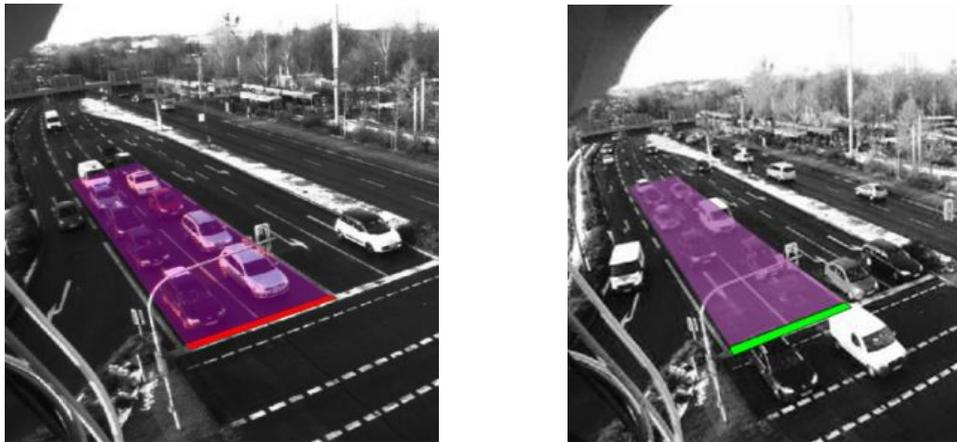


Abbildung 16: Aufbau (li.) und Abbau (re.) eines Rückstaus bei Signalwechsel

Rückstaulängen sind zeit- und spurabhängige Werte, die innerhalb einer Zufahrt je nach Tageszeit und Abbiegespur deutlich variieren können. Dabei sind diese von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Einige dieser Faktoren sind Verkehrsmenge, Fahrzeugzusammensetzung und damit auch Länge der Fahrzeuge, Netztopologie mit der jeweiligen Spuranzahl der Zufahrt und vor allem die Freigabezeit. Abbildung 17 verdeutlicht das Rückstaulängenverhalten in Abhängigkeit von der Freigabezeit als sägezahnartige Kurve. Während der Sperrzeit steigt der Wert allmählich an und steigt weiterhin bzw. verharrt zu Beginn der Freigabe, bevor dieser wieder auf null abfällt. Der verzögerte Abbau des Rückstaus ist damit zu erklären, dass bei Freigabebeginn nicht alle Fahrzeuge gleichzeitig, sondern nacheinander und somit zeitlich versetzt anfahren. Dadurch kann sich die Länge des Staus auch bei Freigabebeginn noch erhöhen, sobald weitere Fahrzeuge auf den Rückstau zufahren und zum Halten kommen, bevor sich das bis dato letzte Fahrzeug in Bewegung setzen konnte. Fällt der Wert innerhalb der aktuellen Freigabezeit nicht auf null ab, ist davon auszugehen, dass der Rückstau sich nicht vollständig abbauen konnte.

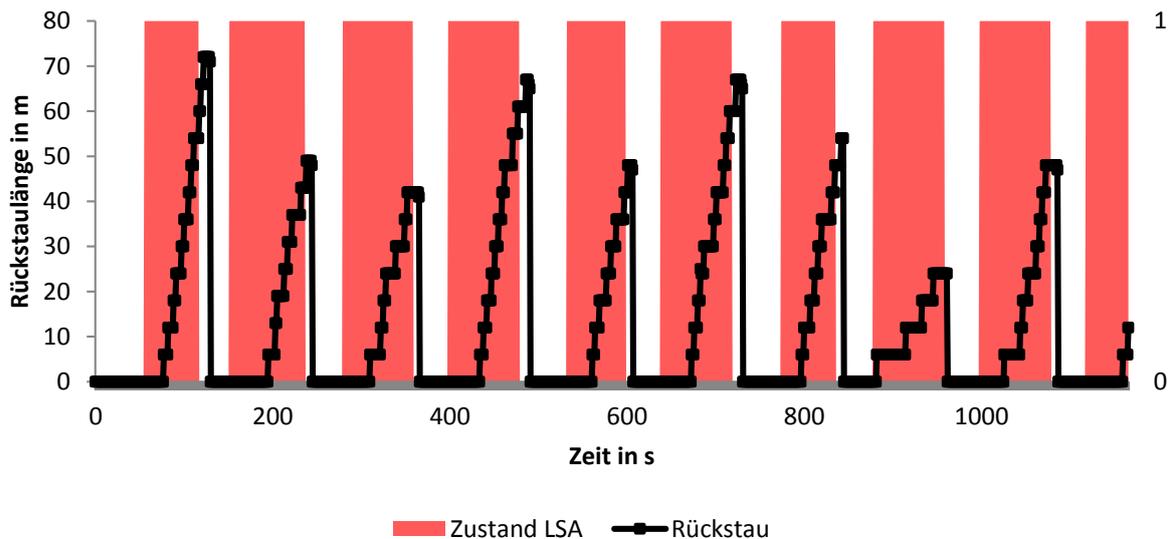


Abbildung 17: Rückstaulänge in Abhängigkeit der Freigabezeiten

Verfahren zur Rückstaulängenschätzung

Neben der Möglichkeit einzelne Fahrzeuge zu zählen, existieren verschiedene Schätzverfahren zur Bestimmung der Rückstaulänge. Recherchen dazu haben die Komplexität und die bestehende Aktualität der Problematik aufgezeigt. Die Herausforderung besteht darin, mittels vorhandener Detektor- und Verkehrsdaten, die oftmals nur in geringer Qualität und Quantität vorliegen, die aktuelle Verkehrslage möglichst genau abzubilden. Entwickelte Verfahren stützen sich auf unterschiedliche Herangehensweisen. Da es vielerorts an Verkehrsdetektoren mangelt, werden zum einen statische Verfahren verfolgt, welche sich auf historische Daten und Ganglinien der Verkehrsstärke berufen. Zum anderen werden dynamische Daten eingesetzt, welche von Verkehrsdetektoren stammen, die aktuelle Daten liefern. Zu den Detektionstechniken zählen unter anderen Induktionsschleifen, Infrarotdetektoren und Kameras. Neben den erwähnten stationären Detektoren kommen auch mobile Detektoren wie FCD zum Einsatz.

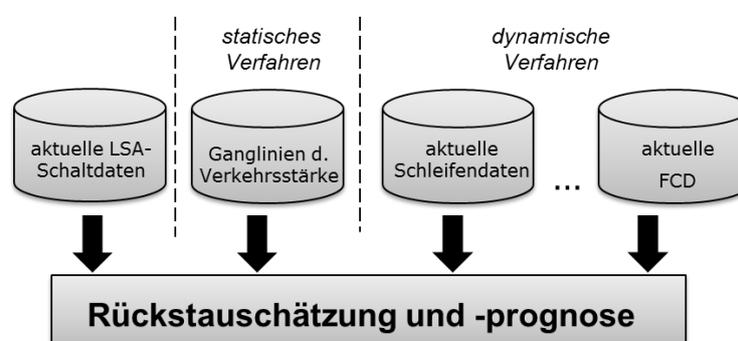


Abbildung 18: Daten zur Rückstauschätzung und -prognose

Im Rahmen des Forschungsprojekts hat man sich weiterhin auf die Verfahren konzentriert, die sich auf der Dresdner Pilotstrecke mit den vorhandenen Verkehrsdetektoren umsetzen ließen. Die Untersuchung ergab, dass in Dresden Detektionstechnologien basierend auf Induktion, Infrarot, GPS und Kamerabildern installiert sind. In Abbildung 19 werden einige Verfahren - sortiert nach den eingehenden Detektionsdaten - aufgelistet. Speziell auf der Pilotstrecke sind Doppelinduktionsschleifen und Kameras zu finden als auch GPS-Daten durch Taxi-FCD verfügbar. Am verbreitetsten sind jedoch Einzelinduktionsschleifen, die sich an lichtsignalisierten Knotenpunkten befinden, so dass die Rückstaulängenermittlung mit Hilfe von Induktionsschleifen tiefergehender analysiert wurde.

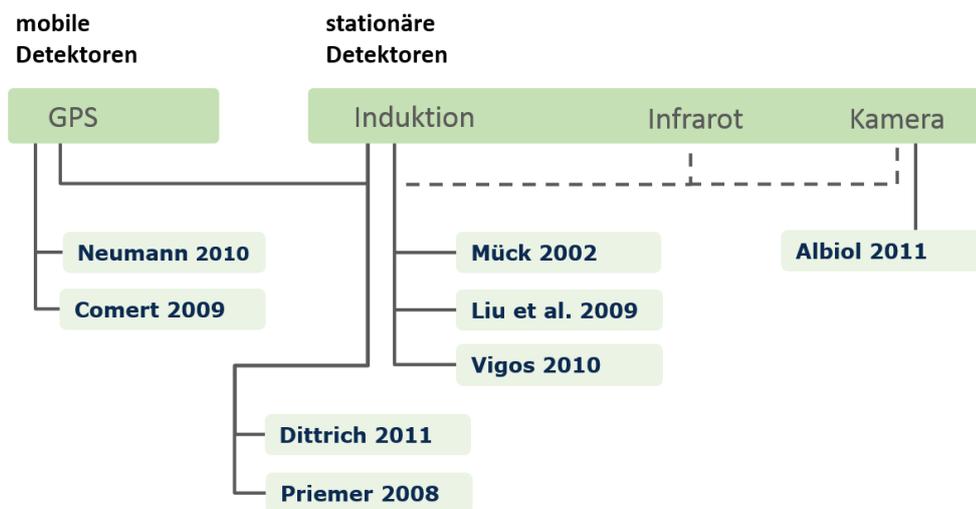


Abbildung 19: Auswahl an Verfahren zur Rückstaulängenberechnung

Im Folgenden soll als Ergebnis der Recherche eine Auswahl an Verfahren basierend auf Daten von Induktionsschleifen vorgestellt werden, die im Forschungsprojekt selbst jedoch keine Anwendung fanden.

Verfahren nach Dittrich und Busch (2011)

Die Ausgangshypothese des Verfahrens besagt, dass je mehr Fahrzeuge pro Umlauf über einen Detektor gefahren sind, desto größer der Rückstau ist. Über eine Produkt-Moment – Korrelation konnte gezeigt werden, dass ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Fahrzeuganzahl und der Rückstaulänge pro Umlauf besteht. Für die Umsetzung des Verfahrens als Rückstaulängenschätzer wird das System zunächst mit empirisch ermittelter Zuordnung zwischen Fahrzeuganzahl und Rückstau initial kalibriert. Im laufenden Betrieb kann die Zuordnung mit Hilfe aktuell erfasster Rückstaulängen dynamisch angepasst werden. Die erforderlichen Detektorkennwerte für das Verfahren bilden die Fahrzeuganzahl pro Umlauf bzw. die Einzelbefahrungereignisse. Die empirischen Untersuchungen des Ansatzes beruhen auf drei Knotenpunkten und der Evaluierung des Systems für einen Fahrstreifen über eine Zeitspanne von 25 Minuten. Die Ergebnisse zeigen, dass der einfache Algorithmus für übersättigten Verkehr nicht geeignet ist. Zusätzlich besteht ein hoher Kalibrierungsaufwand für jeden Fahrstreifen. [Dit11]

Verfahren nach Liu et al. (2009)

Das Verfahren nach Liu et al. beinhaltet folgende Grundidee. Bei der Verkehrsabwicklung an LSA entstehen Bereiche unterschiedlicher Verkehrsdichte. Diese Dichteschwankungen breiten sich in oder gegen Fahrtrichtung mit charakteristischen Geschwindigkeiten aus. Mit Hilfe stationärer Detektoren können die Zeitpunkte der Dichteänderungen erfasst und daraus die Rückstaulänge abgeleitet werden. Für das Verfahren sind der sekundliche Belegungsgrad oder die Einzelbefahrungseignisse erforderlich. Die resultierenden Ergebnisse sind überzeugend, jedoch ist das Verfahren nur für die Schätzung der Rückstaulänge des letzten Umlaufs anwendbar. [Liu09]

Verfahren nach Vigos und Papageorgiou (2010)

In diesem Verfahren wird aus den zeitlichen Belegungsgraden stationärer Detektoren mit Hilfe vereinfachender Modellannahmen auf die mittlere Verkehrsdichte des Fahrstreifens geschlossen. In Abhängigkeit von der Anzahl und Lage stationärer Detektoren werden unterschiedliche Schätzer für die Rückstaulänge angegeben. Falls sich ein Detektor im Zufluss, ein Detektor im Abfluss und ein Detektor auf der Strecke befinden, wird das Kalman-Filter verwendet. Beim Vorhandensein eines oder mehrerer Detektoren auf der Strecke wird die Exponentielle Glättung eingesetzt. Hierfür erforderliche Detektorkennwerte sind auf die Umlaufzeit aggregierte Belegungsgrade. [Vig10]

Im Forschungsprojekt wurden drei Verfahren verfolgt und anschließend umgesetzt, die sich von der grundsätzlichen Herangehensweise unterscheiden. Zum einen wurde das statische Verfahren nach Wu umgesetzt als Rückfallebene an Knotenpunkten ohne aktueller Detektordaten. Zum zweiten wurde das dynamische Verfahren nach Mück umgesetzt, welches Daten aus Einzelinduktionsschleifen nutzt. Zuletzt wurde ein simulativer Ansatz verfolgt, wobei basierend auf Echtzeitsimulationen Rückstaulängen bestimmt werden.

Statisches Verfahren nach Wu

Das Verfahren nach Wu basiert auf einem Warteschlangenmodell. Für die Berechnung werden zum einen aktuelle und prognostizierte Schaltdaten der Lichtsignalanlagen als auch die zu erwartende Verkehrsmenge mit Hilfe von Tagesganglinien genutzt. Als allgemeine Formel wird dazu folgende angegeben:

Formel 3:
$$N_{xxx} = N_{GExx}(\alpha') + \beta'(q * C)(1 - \lambda) + \gamma'(q * C)^n$$

N	mittlere Rückstaulänge
N_{GE}	mittlere Rückstaulänge am Grünende
q	Verkehrsstärke
C	Länge der Umlaufzeit
λ	Grünzeitanteil = Grünzeit/Umlaufzeit
n	Anzahl der Fahrstreifen
α, β, γ	Parameter

Die Grundformel kann an verschiedene Bedingungen angepasst werden. Es werden drei Kategorien unterschieden, wobei die Rückstaulänge folgendermaßen unterteilt werden kann:

- nach ihrer Percentile 99%, 95% und der mittleren Rückstaulänge;
- nach den Zeitpunkten Grünende, Rotende und Stauende;
- nach den Verkehrszuständen stationär, instationär, frei und teilgebunden.

Im Projekt wurde die mittlere Rückstaulänge am Grünende umgesetzt, welche sich nach dem Verfahren nach Wu wie folgt berechnet:

Formel 4:

$$N_{GE} = \begin{cases} 0 & x = 0 \\ \frac{e^{-1,33 \cdot \sqrt{sG} \cdot \frac{1-x}{x}}}{2(1-x)} & 0 < x < 1 \\ N_{max} & x \geq 1 \end{cases}$$

s	Sättigungsverkehrsstärke
G	Länge der Grünzeit
x	Auslastungsgrad

Aufgrund der Verwendung statischer Daten kann das Verfahren insbesondere auch an Knotenpunkten ohne aktuelle Detektordaten als Rückfallebene genutzt werden. [Wu96]

Dynamisches Verfahren nach Mück (2002)

Das Verfahren nach Mück geht von der Beobachtung aus, dass sich Fahrzeuge nach Freigabeende hinter der Haltelinie schneller aufstellen, wenn der Rückstau zuvor nicht vollständig abgebaut wurde. Auf Grundlage dieses Gedankens wird ein geglätteter Staukennwert δ definiert, welcher aus der Füllzeit, einer vom Abstand zwischen Detektor und Haltelinie abhängigen Referenzdauer δ_{ref} und verschiedenen Wichtungsfaktoren resultiert. Die Füllzeit beschreibt die Dauer zwischen dem Freigabeende und der Dauerbelegung des Detektors.

Formel 5:

$$\delta = \begin{cases} 1 & dt \leq \delta_{ref} \\ 0 & dt > \delta_{ref} \end{cases}$$

Empirisch wurde nachgewiesen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem geglätteten Staukennwert und der Rückstaulänge L besteht (s. Abb. 20), weshalb aus der gemessenen Füllzeit auf die Rückstaulänge geschlossen werden kann. Es folgt mit dem Regressionsgradenanstieg m :

Formel 6:

$$L = m * \delta$$

Die Kalibrierung der Modellgleichung für jeden Fahrstreifen kann online erfolgen, wobei neben der Füllzeit auch die Anzahl der abgeflossenen Fahrzeuge benötigt wird.

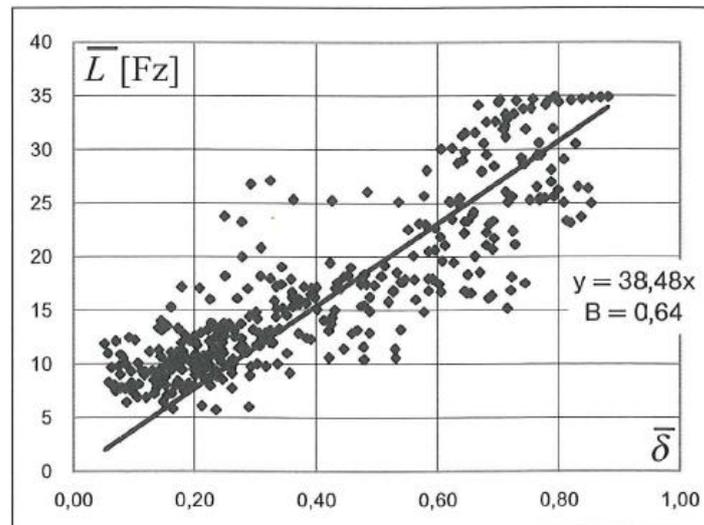


Abbildung 20: Maximale Staulänge \bar{L} über dem geglätteten Staukennwert $\bar{\delta}$
[Mue02, p. 614]

Das Verfahren nach Mück erfordert als Eingangsgröße den Zeitpunkt nach dem Freigabeanfang bis zur Dauerbelegung des Detektors. Im Ergebnis konnte mit Hilfe mikroskopischer Verkehrsflusssimulation und in Feldversuchen gezeigt werden, dass maximale Rückstaulängen bis etwa zum 5- bis 10-fachen des Abstands zwischen Haltelinie und Detektor gut erfasst werden. Anzumerken ist, dass Rückstaulängen, die kürzer als der Abstand zwischen Haltelinie und Detektor sind, mit dem Verfahren nicht erfasst werden können. [Mue02]

Einsatz von Echtzeitsimulationen

Als ein gutes Mittel der Rückstaulängenermittlung stellte sich neben der analytischen Herangehensweise die Verkehrsflusssimulation mit Hilfe von Echtzeitdaten heraus. Dazu wurde die Pilotstrecke anhand der Simulationssoftware SUMO („Simulation of Urban Mobility“, DLR Berlin) modelliert. Das Netzmodell, bestehend aus Straßen- und Schienennetz - wurde originalgetreu nachgebildet. Es basiert auf UTM-Koordinaten und besitzt spurfeine Kanten sowie reale Kantenverbindungen. Die zulässige Streckenhöchstgeschwindigkeit wurde mit 60 km/h angenommen, da dieser Wert näher an den tatsächlich gefahrenen realen Geschwindigkeiten ist als die für innerorts vorgeschriebene Maximalgeschwindigkeit von 50 km/h gemäß StVO.

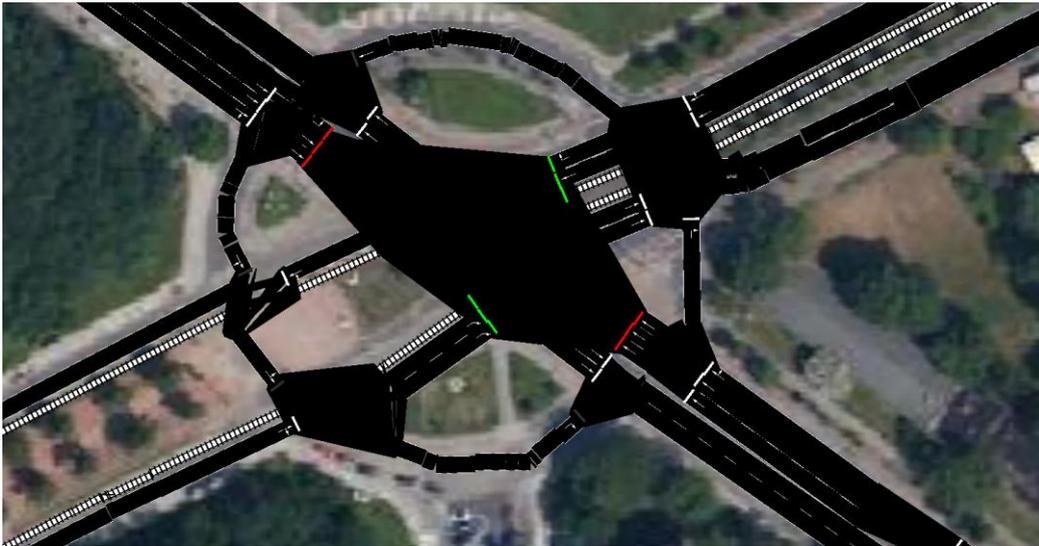


Abbildung 21: Ausschnitt Netzmodell, lichtsignalisierter Knotenpunkt Nürnberger Platz
[Kartenquelle: Google Maps]

Die in der Simulation eingesetzten Fahrzeuge werden in 8+1 Fahrzeugklassen unterteilt. Unterschieden werden Pkw, Pkw mit Anhänger, Lkw, Lkw mit Anhänger, Sattel-Kfz, Busse, Lieferwagen und Krafträder sowie eine zusätzliche Klasse für nicht identifizierbare Fahrzeugtypen. Die Fahrzeugparameter wie Länge, Höchstgeschwindigkeit oder das Beschleunigungsverhalten werden an die jeweilige Fahrzeugklasse angepasst.

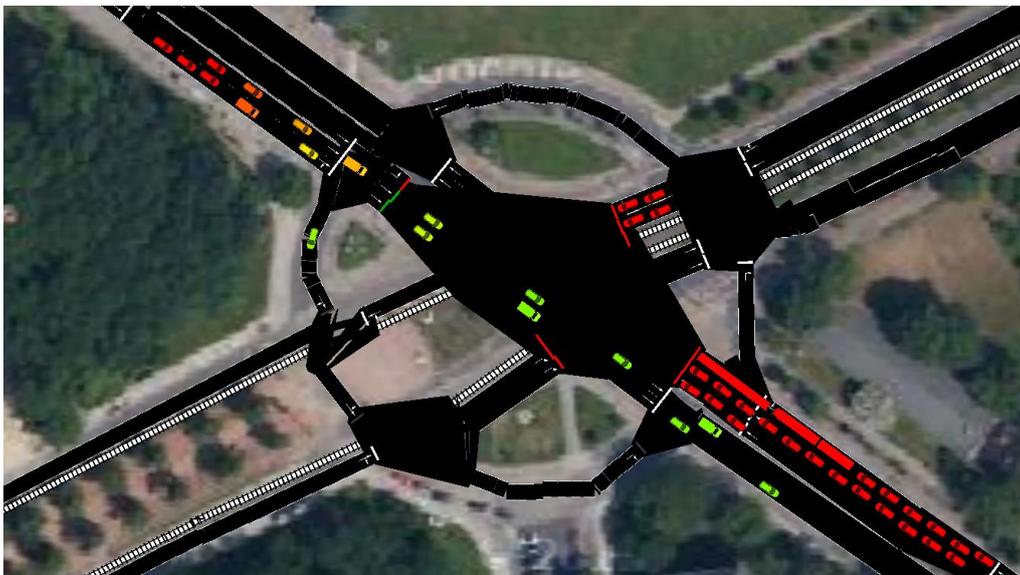


Abbildung 22: Screenshot Simulation, Nürnberger Platz, eingefärbt nach Geschwindigkeit
(rot: 0km/h; gelb: 10 km/h; grün 20 km/h) [Kartenquelle: Google Maps]

Die verwendeten Verkehrsmengen werden der Dresdner Verkehrsmengenkarte entnommen, welche durchschnittliche Tagesverkehrswerte beinhaltet. Mittels einer Tagesganglinie kann der 24-h-Wert auf kleinere Zeitintervalle heruntergebrochen werden. Zusätzlich werden Echtzeitdaten aus Pegelzählstellen eingesetzt, welche sich auf der Pilotstrecke befinden. Dadurch können neben der Verkehrsstärke auch Informationen über Typ, Geschwindigkeit und Zeitstempel der Fahrzeuge gewonnen werden. Jedem simulierten Fahrzeug wird eine Route zugeordnet, auf welcher sich dieses durch das Simulationsnetz bewegt. Die Beeinflussung des Verkehrs erfolgt über Lichtsignalanlagen. Für jede LSA ist ein Steuerungsprogramm hinterlegt, welches jedoch durch Echtzeitdaten der Schaltzeiten ausgetauscht werden kann, um reale Schaltvorgänge zu reproduzieren. Während den Simulationsdurchläufen können Rückstaulängen mit Hilfe von eingepflegten virtuellen Detektoren zu jedem Zeitschritt ermittelt werden. Insofern als Eingangsdaten möglichst Echtzeitdaten eingesetzt werden, kann abschnittsweise ein realitätsnaher Zustand der Verkehrslage hergestellt und damit auf repräsentative Rückstaulängen geschlossen werden.

AP 1.4.5 Methoden zur spurgenaueu Ortung

Die spurgenaue Ortung ist insofern von Bedeutung, dass der Fahrer in Fahrsituationen des Kreuzungsbereiches nicht durch zu viel Informationen abgelenkt wird bzw. Informationen selektieren muss, sondern nur die für seine Abbiegerelation nötige Information (z.B. Restrotlaufzeit) angezeigt bekommt. Die Grundlage dafür bildet eine spurgenaue Ortung des Fahrzeugs.

Zusammenfassend kann berichtet werden, dass im Bereich der spurgenaueu Ortung die auf Basis von GPS ermittelten Positionen durch Fusion mit anderen Sensordaten wie der axialen Beschleunigungen und den Drehraten um die Fahrzeughochachse einer Inertial Measurement Unit (IMU) und digitaler Karte (Digital Enhanced Map) hinsichtlich einer Spurdetektion weiter verbessert werden konnten.

Primär wurden dazu Kalman- und Partikelfilter als zwei vielversprechende Ansätze theoretisch untersucht und programmtechnisch umgesetzt. Um die Leistungsfähigkeit der Verfahren einschätzen zu können, wurden die zwei Filter auf synthetische verrauschte Daten angewendet. Dies führte zu einer Verbesserung der Positionsgenauigkeit gegenüber der reinen GPS-Positionierung. Weiterhin wurden nach Fertigstellung und Inbetriebnahme des Versuchsträgers die Algorithmen validiert und entsprechend angepasst. Es zeigte sich als zielführend, dass bei einer parallelen Nutzung der Filter sowie eines Multihypothesenansatzes in Verbindung mit einer digitalen Karte und der KAFAS Fahrzeugkamera, für die Versuchstrecke eine Spurdetektion für alle durchgeführten Fahrten erreicht werden konnte. Die Abbildung 23 zeigt dazu eine Übersicht der dazu verwendeten fahrzeugseitigen Sensorik sowie der eingesetzten Filtertechniken.

Da zum Projektstart bzw. über den Projektzeitraum keine spurgenaue digitale Karte vorlag, waren für die Erstellung der digitalen Karte Vermessungsarbeiten notwendig. Diese konnten vollständig auf der Verifikationsstrecke durchgeführt werden. Dabei wurden neben der Straßengeometrie auch die Signalgruppen mit den dazugehörigen Haltelinien ermittelt und mit vorhandenen Signalplänen abgeglichen. In der Folge wurde aus diesen Messpunkten eine erweiterte digitale Karte (Digital Enhanced Map) erstellt. Dabei mussten alle Spuren

und deren Beziehungen untereinander händisch erfasst werden. Leider erwies sich das OpenLR-Format als ungeeignet, um die nötigen Nachbarschaftsbeziehungen, wie sie z.B. für die Detektion von Spurwechseln benötigt werden, abzubilden. Deswegen wurde die Karte, welche die Grundlage zur spurgenaueu Ortung bildet, in einem dem OpenStreetMap-Datenmodell ähnelndem XML-Format abgespeichert.

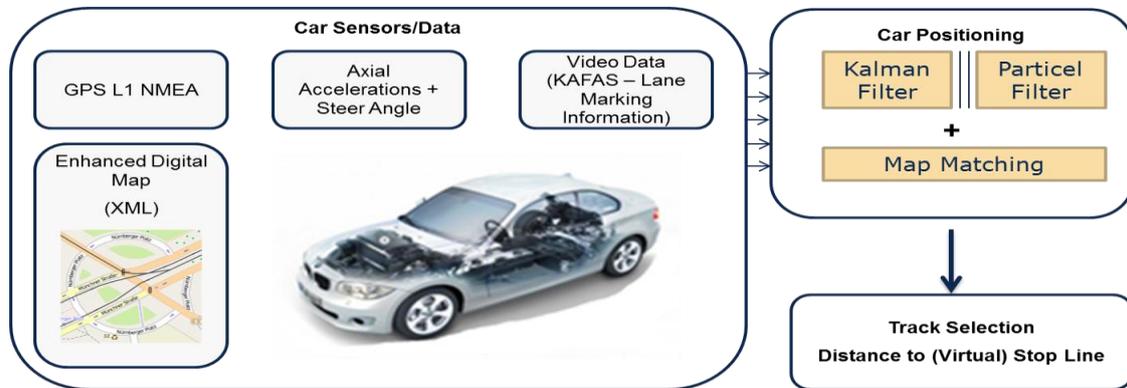


Abbildung 23: Übersicht der dazu verwendeten fahrzeugseitigen Sensorik sowie der eingesetzten Filtertechniken zur spurgenaueu Ortung

Um Fehler bei der Erstellung der XML-Dateien ausschließen zu können, wurden die Kartendaten mit einem eigenen Programm zur Visualisierung in Google Earth konvertiert und konnten gegen ein Satellitenbild validiert werden. Basierend auf allen diesen Sensordaten konnte eine GUI angepasst/entwickelt werden, welche während einer Fahrt alle relevanten Informationen in Echtzeit bereitstellt (Abbildung 24).

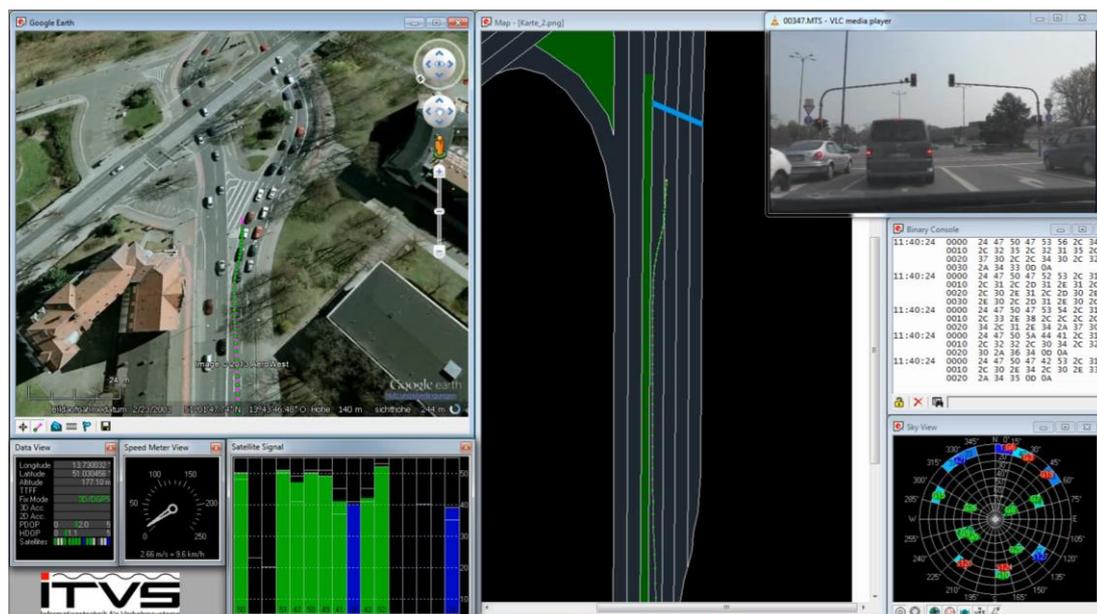


Abbildung 24: GUI, welche während einer Fahrt alle relevanten Informationen in Echtzeit bereitstellt – hier Position in Google Earth vs. eigener spurgenaueu Karte, Fahrerblick und GNSS-Satelliteninformationen

AP 1.4.6 Befähigung Verkehrsmanagementzentrale gemäß Spezifikation

Es wurde ein Webservice konzipiert und umgesetzt, welche die Ergebnisse der Schaltzeit- und Rückstauprognose im vorher definierten Datenaustauschformat Datex II zyklisch an den Serviceprovider (BMW) überträgt. Die derzeit anfallenden Datenmengen sind zufriedenstellend, da konsequent auf konventionelle Kompressionsverfahren (GZIP) bei der Datenübertragung geachtet wurde. Somit sollte auch die Übertragung von einer größeren Anzahl LSA-geregelter Kreuzungen kein Problem darstellen. Die Verarbeitung der Daten beim Serviceprovider ist u.U. dabei der Flaschenhals (bottle neck), da sehr viele Daten in sehr kurzer Zeit verarbeitet und für den Datenaustausch mit den Fahrzeugen vorbereitet werden müssen.

Ergebnisse

Die in AP 1.4.3 und 1.4.4 entwickelten Algorithmen wurden mit Hilfe von Java umgesetzt und in einen Webservice integriert. Somit kann auf eine allgemeine SOAP-Schnittstelle (Simple Object Access Protocol) zurückgegriffen werden, welche sehr gut in bestehende Softwaresysteme integriert werden kann.

Der entwickelte Dienst ist seit mehreren Monaten erfolgreich im Einsatz und liefert derzeit online Schaltzeitprognosen für über 200 Lichtsignalanlagen in Dresden [DD11, DD14]. In Abbildung 25 sind die derzeit verfügbaren LSA mit Schaltzeitprognose schematisch dargestellt.

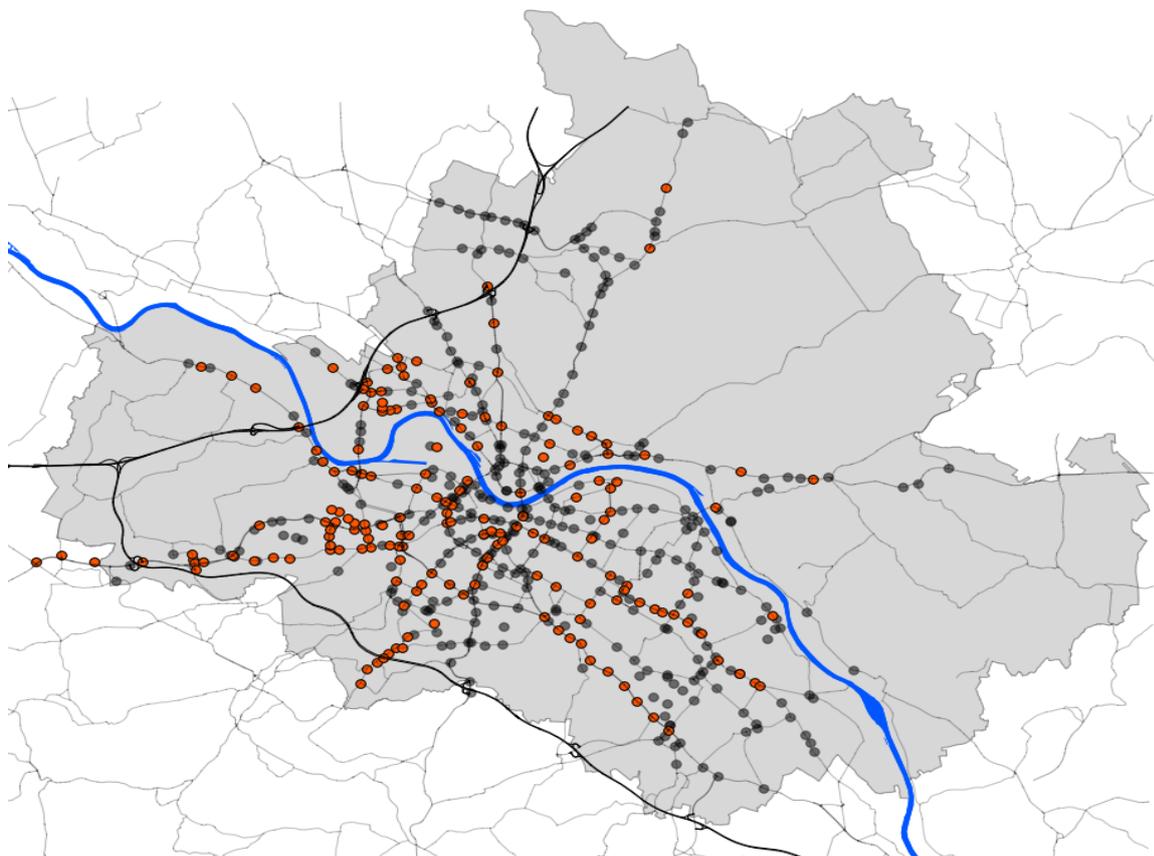


Abbildung 25: Orange: mit Prognose (ca. 200), Schwarz: ohne Prognose (ca. 270)

Für die korrekte Interpretation der Daten und der entsprechenden Zuordnung an die betreffenden Elemente der Verkehrsinfrastruktur ist es zunächst notwendig die Datenbanken zu erstellen. Da sich dieser Prozess als sehr langwierig herausgestellt hat, wurden im Projekt EFA2014/2 lediglich die zuvor konzipierte Pilotstrecke aufgenommen.

AP 1.4.7 Schnittstelle Backend-Fahrzeug/Befähigung Fahrzeug

Im Rahmen des Projektes wurden Informationen von der Verkehrsleitzentrale (Daten Provider) an BMW übertragen (Service Provider). Durch frühe Funktionstests der Datenschnittstellen, wurden in dem in Dresden eingesetzten Versuchsträger auch native Lösungen umgesetzt. Für den späteren Einsatz im Fahrzeug wird von BMW die TPEG De- und Encodierung vorgenommen.

Die messtechnische Ausstattung des Versuchsträgers wurde im Laufe des Projektes vielfach erweitert bzw. modifiziert. Beispielsweise konnte durch den Tausch des Routers und Einbau weiterer Hardware von Seiten der TU Dresden eine Verbindung zum Internet hergestellt werden. Dies war eine wichtige Voraussetzung, um später Daten vom Serviceprovider zu beziehen. Die Schnittstelle zum CAN-Bus wurde aufgrund der verzögerten Auslieferung des Versuchsträgers mit einer Verzögerung vollständig umgesetzt.

AP 1.4.8 Labortests der Datenübertragungskette

Im Bereich der Datenübertragung konnte die erste Teilstrecke von der Verkehrsmanagementzentrale zum Serviceprovider im Labor untersucht werden. Mit den vorhandenen LSA-Daten und der Karte wurden exemplarische Datex-II-Pakte erstellt und an den Serviceprovider versendet. Um realistische Übertragungsszenarien mit den dabei auftretenden Datenraten und Störungen für die Untersuchungen bereitstellen zu können, wurde ein Wide Area Network Emulator eingesetzt. Mit dessen Hilfe konnte die sehr gute Datenverbindung für einzelne Szenarien beeinträchtigt werden. Für die erfolgten Latenzzeittests wurde ein eigenes Programm zur Simulation eines Clients erstellt. In den Tests zeigte sich, dass die Übertragung der Karte mittels Datex im Schnitt 4,479 Sekunden dauerte, was durch ZIP-Komprimierung der Daten auf 1,499 Sekunden bei 50 Mbit/s gesenkt werden konnte. Soll die Karte allerdings die gesamte Stadt Dresden umfassen, so wird man mindestens mit einem Faktor von 150 bis 200 bei der Übertragungsdauer rechnen müssen, allein um alle Ampelkreuzungen abzudecken. Deswegen ist eine regelmäßige Übertragung der gesamten Karte nicht sinnvoll. Die LSA-Daten-Übertragung für eine Kreuzung dauert unter selben Bedingungen 0,529 Sekunden bzw. 0,266 Sekunden bei Einsatz einer ZIP-Komprimierung.

Auf der Funkstrecke konnte der Basisstationssimulator erfolgreich in Betrieb genommen werden. Dieser unterstützt den SMS- und Datenversand an eine beliebige Anzahl von Endgeräten. Um mit dieser Sendeanlage nicht als Störer aufzutreten, wurde die Übertragung kabelgebunden zwischen den Antennenanschlüssen realisiert. Damit die Latenzzeittests realitätsnah durchgeführt werden konnten, wurde die Signalqualität auf der Teststrecke untersucht.

Dafür wurde eine Android App geschaffen, welche die Downloaddauer der LSA-Daten, die Signalstärke und GPS-Position erfasst sowie speichert (Abbildung 26).

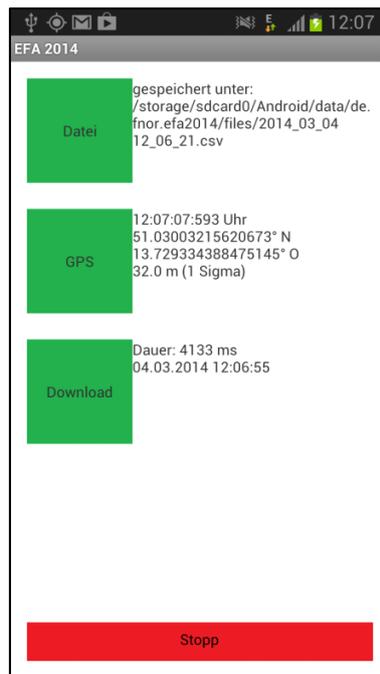


Abbildung 26: GUI der eigens erstellten Android App, welche die Downloaddauer der LSA-Daten, die Signalstärke und GPS-Position erfasst und speichert

Diese startet automatisch, wenn das Smartphone per USB verbunden ist. Auf dieser Basis wurden drei Lichtsignalanlagen als potenzielle Problembereiche für die Datenübertragung identifiziert. Ebenso zeigte sich auch ein großer Einfluss durch umliegende Verkehrsteilnehmer. So kann ein einzelner LKW einen Verbindungsabbruch herbeiführen. Zur Realisierung der Datenübertragung musste auch das Fahrzeug für den Empfang befähigt werden. Dazu wurde der Router getauscht, um an diesem per USB einen Empfänger zu betreiben. Dadurch verfügen die interne Messtechnik, sowie weitere über WLAN integrierbare Rechner über eine Datenverbindung z.B. zum Serviceprovider. Einen Überblick über die umgesetzte laborseitige Kommunikationskette zeigt die nachfolgende Abbildung 27. In dieser sind im oberen Bereich die realen Informationskanäle/-beziehungen und im unteren Bereich die äquivalent im Labor umgesetzten verdeutlicht.

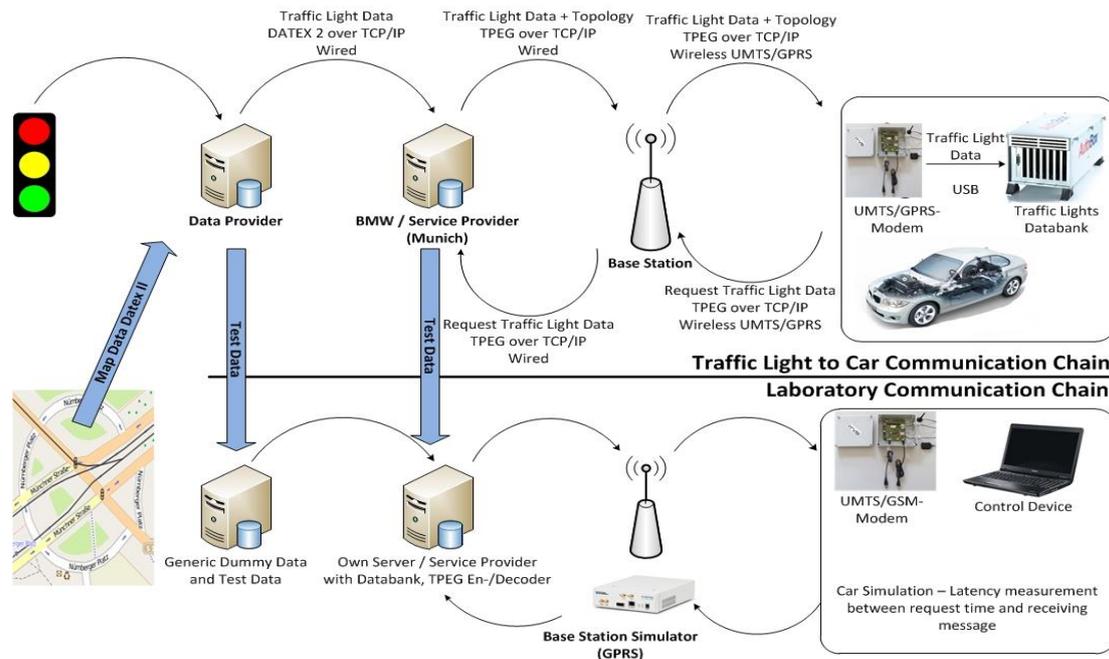


Abbildung 27: Überblick über die umgesetzte laborseitige Kommunikationskette.
Oben: reale Informationskanäle; unten: äquivalent im Labor umgesetzte

AP 1.4.9 Test und Validierung

Schaltzeitprognose

Es fanden zum einen verschiedene Validierungen der Prognosedaten offline durch Vergleich der prognostizierten Daten mit den tatsächlich eingetretenen Schaltzuständen statt. Zum anderen fanden Validierungen direkt an den Anlagen statt, um beispielsweise zeitliche Offsets zu berücksichtigen. Dazu wurden mobile Applikationen („Apps“) speziell für den Einsatz auf Smartphones und Tablets entwickelt. In Abbildung 28 und 29 wird der Einsatz der Schaltzeitprognose, am Beispiel des Nürnberger Platzes in Dresden, dargestellt.

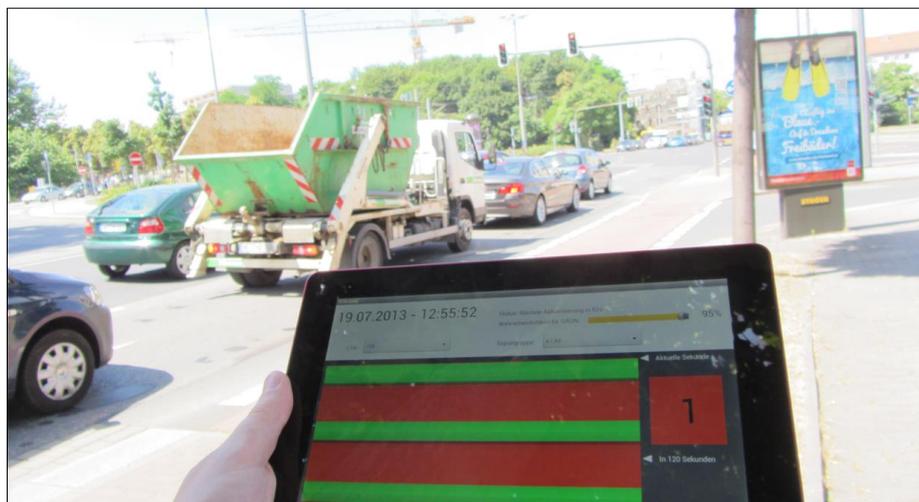


Abbildung 28: Schaltzeitprognose als mobile "App" für Tablet und Smartphone



Abbildung 29: Schaltzeitprognose auf Basis von Wahrscheinlichkeitsvektoren

Zur Information des Fahrzeugführer dient im Forschungsprojekt EFA2014/2 ein MMI Konzept im Fahrzeug. In Abhängigkeit der Prognosegüte und des erreichbaren Energieeinsparpotentials werden dem Fahrer verschiedene Informationen oder Fahrempfehlungen vorgegeben. Bei sehr hoher Zuverlässigkeit der prognostizierten Daten und einem hohen Einsparpotential wird der Fahrer sowohl optisch als auch haptisch über ein Fahrpedal auf die Fahrempfehlung hingewiesen. Bei schlechter Prognosegüte und wenig Einsparpotential, wird dem Fahrer keine Empfehlung gegeben. Dazwischen existieren verschiedene Ausbaustufen dieser Fahrempfehlung, die in Probandenversuchen noch detailliert untersucht werden müssen.

Rückstaulänge

Die Validierung von Rückstaulängenprognosen erweist sich grundsätzlich als schwierig. Zum Vergleich sind Messungen notwendig, welche aufwendigen manuellen Prozessen unterliegen. Aufgrund nicht vorhandener Verkehrsdetektoren in Dresden, die einen Rückstau direkt messen könnten, sind automatisierte Messungen vor Ort nicht möglich. Es wurde daher auf Verfahren zurückgegriffen, mit denen Rückstaulängen geschätzt werden können. Für die betrachteten Schätzungsmodelle werden Eingangsdaten benötigt, die mit der gegebenen Detektionstechnik nur bedingt ermittelt werden können. Daher hat sich gezeigt, dass es bei möglichen mathematischen Verfahren, wie z.B. nach Wu bzw. Mück, zu hohen Abweichungen kommt. Die Verwendung von Simulationen zur Rückstaulängenschätzung hat sich als vielversprechenderes Verfahren herausgestellt. Hierfür wurde die Simulationssoftware „Simulation of Urban Mobility“ (SUMO) eingesetzt, die durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt wird. Anforderungen an eine solche erfolgsversprechende Verkehrsflusssimulation sind zum einen die Versorgung mit echten Daten hinsichtlich LSA-Schaltzeiten, Verkehrsmengen, u.a., welche aus der zur Verfügung stehenden Detektionstechnik gewonnen werden können. Die realen Daten sind entscheidend für die Kalibrierung der Simulation, um ein realitätsnahes Ergebnis zu erlangen. Durch den Einsatz aktueller Werte kann die Simulation im Verlauf stets nachkalibriert werden. Zum

anderen sollte die Simulation schneller sein als Echtzeit, so dass nicht nur aktuelle Rückstaulängen geschätzt, sondern auch zukünftige Rückstaulängen prognostiziert werden können. Innerhalb der Simulation sind Rückstaulängen und Aufenthaltszeiten visuell darstellbar und durch virtuelle Detektoren direkt messbar. In Abbildung 30 sind die eingesetzten virtuellen Detektoren hellblau eingefärbt.



Abbildung 30: Simulation der Zufahrt Nürnberger Straße am Fritz-Förster-Platz



Abbildung 31: Realer Rückstau am simulierten Knotenpunkt Fritz-Förster-Platz

Die Verifikation der simulativ ermittelten Rückstaulängen erfolgte anhand von Kamerabildern (vgl. Abb. 31). Durch die späte Installation der Kameras auf der Pilotstrecke, konnte

der Prozess jedoch nur abschnittsweise untersucht werden. Dabei hat man sich exemplarisch zwei Kreuzungen herausgesucht, wozu der Fritz-Förster-Platz mit der Zufahrt Nürnberger Str. und der Knotenpunkt Teplitzer Str./Zellescher Weg/C.-D.-Friedrich-Str. mit der Zufahrt Zellescher Weg gehören. Im Vergleich von simulierter und realer Rückstaulänge (s. Abb. 32) wird deutlich, dass die Ergebnisse nahezu identisch sind. Das Diagramm in Abbildung 33 unterlegt diese Aussage mit Hilfe der Darstellung des absoluten Fehlers. Es ergibt sich eine durchschnittliche Abweichung, die kaum größer als eine Fahrzeuglänge von sechs Metern ist. Letztendlich konnte gezeigt werden, dass die Echtzeitsimulation ein probates Mittel zur Prognose von Rückstaulängen und Aufenthaltszeiten ist.

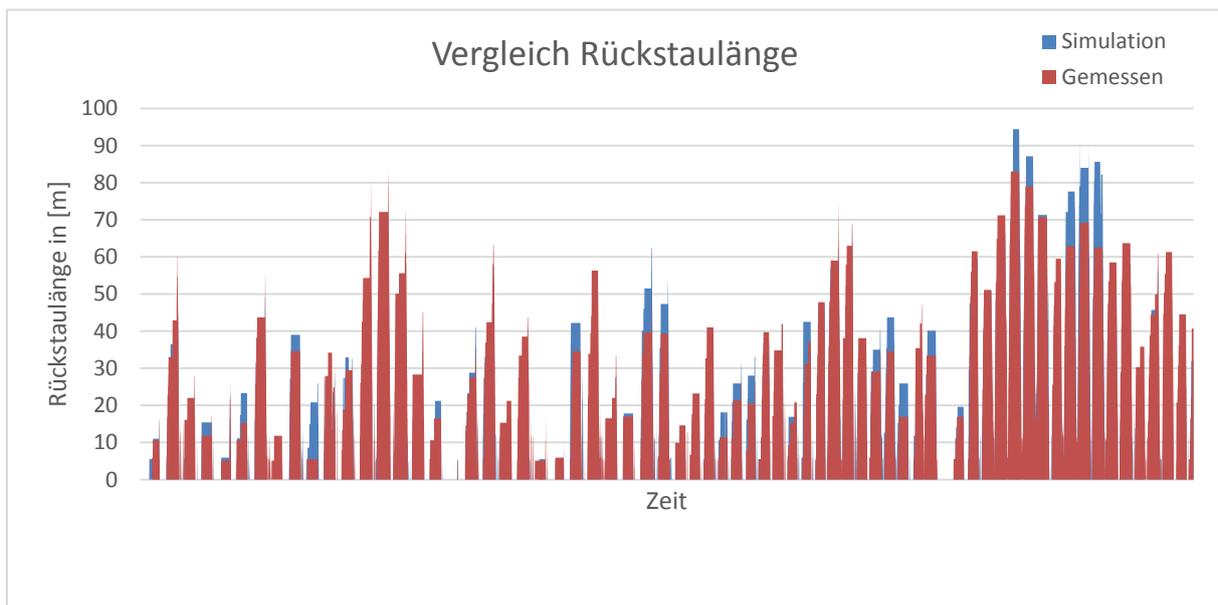


Abbildung 32: Vergleich realer und simulierter Rückstaulänge

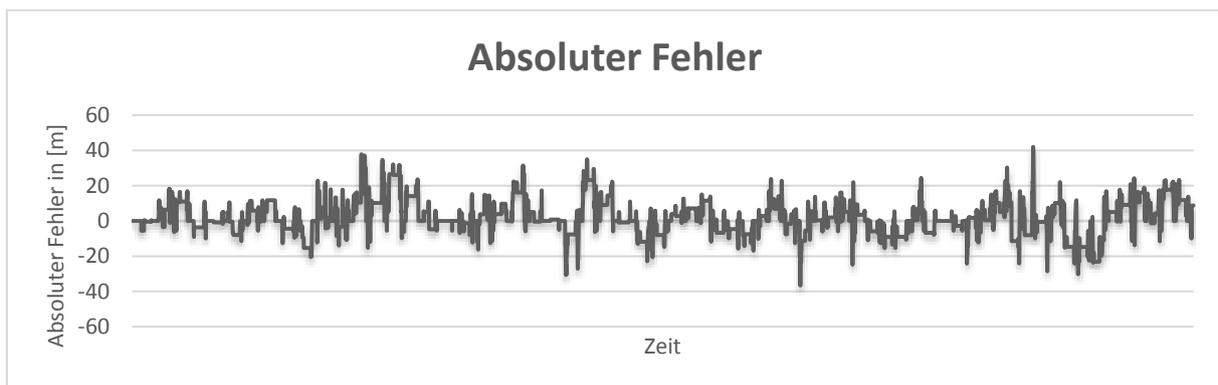


Abbildung 33: Absoluter Fehler zwischen realen und simulierten Rückstaulängen

AP 1.4.10 Gremienarbeit mit dem Ziel der Standardisierung

Die Datenschnittstelle wird auch in weiteren aktuellen Forschungsprojekten eingesetzt. Zu nennen wäre hier das F/E Projekt UR:BAN welches die entwickelten Datex II Erweiterung implementiert hat.

AP 2.1: Range-Extender-Betriebsstrategien

Dieses Kapitel fasst die im Arbeitspaket 2.1 - Vorausschauende Betriebsstrategie von Range Extender Modulen des Verbundprojekts EFA 2014/2 erarbeiteten Ergebnisse zusammen. An diesem Arbeitspaket waren der Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik und der Lehrstuhl Verbrennungsmotoren der Technischen Universität Dresden beteiligt. Die in dem Arbeitspaket zu erreichenden Ziele und Teilarbeitspakete sind in [BS11] definiert. Die Struktur der Unterkapitel hält sich an die dort getroffene Gliederung der Teilarbeitspakete.

Ziel des Arbeitspakets ist die Entwicklung einer Betriebsstrategie für ein Fahrzeug mit seriellem Range-Extender-Modul unter besonderer Berücksichtigung der Emissionen und einem langem Prädiktionshorizont.

AP 2.1.1 Anforderungsdefinition

In diesem Teilarbeitspaket wurden die Anforderungen definiert, die ein Fahrzeug mit Range Extender erfüllen muss und daraus Ansprüchen an den Antriebsstrang abgeleitet.

Antriebsstrangarchitektur

Das Projekt EFA 2014/2 behandelt vorrangig Elektrofahrzeuge und die Erhöhung ihrer Reichweite. Elektrofahrzeuge sind daher auch Basis der Modellierung dieses Arbeitspakets. Diese Basis wird simulativ mit einem Range-Extender-Modul ergänzt, um ein Modell eines elektrischen Hybridfahrzeugs zu erhalten.

Möchte man ein bestehendes Elektrofahrzeug um ein Range Extender Modul erweitern, bietet sich eine serielle Antriebsstrangarchitektur an. Die Fahrzeugbatterie gibt elektrische Energie an einen Elektromotor ab, dessen mechanische Energie die Antriebsräder des Fahrzeugs antreibt. Bei Bedarf kann ein Verbrennungsmotor gestartet werden, der über einen separaten generatorisch betriebenen Elektromotor die Fahrzeugbatterie oder die Antriebsaggregate mit elektrischer Energie versorgt. Es besteht keine mechanische Verbindung zwischen dem Verbrennungsmotor und den Antriebsrädern. Zur Steuerung der genannten Bauteile des Antriebssystems ist eine Leistungselektronik notwendig. Die Kombination aus Verbrennungsmotor, Generator und der zugehörigen Leistungselektronik stellt das Range Extender Modul dar. Generell wird diese Kombination als Range Extender verstanden. Es ist aber auch möglich statt eines Verbrennungsmotors mit einem Generator andere Energiewandler wie z.B. Brennstoffzellen zu nutzen. Diese Technologie ist Teil aktueller Entwicklungsthemen bei Fahrzeugherstellern, wobei deren zukünftige Relevanz aufgrund hoher Kosten, begrenzter Kundenakzeptanz und Lebensdauer noch unklar ist [Reu13, Gop13]. Bis zum Einsatz in einer breiten Fahrzeugmasse, bedient der Verbrennungsmotor die Anforderungen von Herstellern in Kunden in einem besseren Maß.

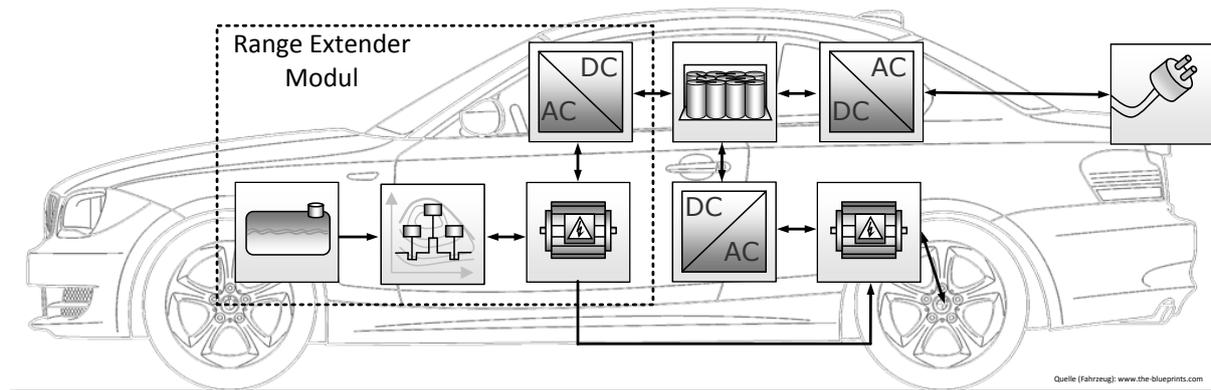


Abbildung 34: Modell des Fahrzeugs mit seriellen Range Extender Modul

Die sich ergebende Antriebsstrangarchitektur ist in Abbildung 34 gezeigt. Neben der Möglichkeit die Fahrzeugbatterie aus einer externen Stromquelle mit Energie zu versorgen (Plug In), kann der nötige Ladezustand der Fahrzeugbatterie mit dem genannten Range-Extender-Modul abgesichert werden. Im Fall hoher Antriebsleistung ist eine direkte elektrische Verbindung von Motor und Generator möglich, um eine Minderung der Effizienz infolge Verluste in der Leistungselektronik zu vermeiden.

Kundenbedürfnis

Reine elektrische Fahrzeuge besitzen im Gegensatz zu Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb den Nachteil, dass die verbauten Fahrzeugbatterien aufgrund einer kleineren Energiedichte die Reichweite verringern. Weiterhin ist im Gegensatz zum Beladen elektrischer Speicher deutlich mehr Zeit als zum Betanken eines Fahrzeugs nötig. Eine Minimierung dieses Unterschieds ist durch Schnelladestationen möglich, welche jedoch die Lebensdauer der Fahrzeugbatterie verringern und kaum verfügbar sind.

Die Summe dieser Faktoren führt zur Kundenangst das Ziel nicht zu erreichen, was im Fachjargon als "Range Anxiety" bezeichnet wird [GN11]. Bei kalten Außentemperaturen werden die Bedenken weiter erhöht, da hochlastige Nebenverbraucher wie Heizung oder Klimaanlage ebenfalls durch die Batterie gespeist werden, wodurch die Reichweite erheblich verringert wird [Buß12].

Ein Range Extender mindert die Ängste der Kundschaft, da im Notfall ein konventioneller Antrieb zur Verfügung steht, der die Erreichung des Ziels bei weiten Fahrstrecken ermöglicht.

Geräuschemissionen

Fahrzeuglärm wird in Zukunft vor allem von Seiten des Gesetzgebers eine immer größere Beachtung finden [Fra13]. Ein Vorteil von Elektrofahrzeugen gegenüber konventionell betriebenen Fahrzeugen liegt in der geringeren Geräuschkentwicklung bei Geschwindigkeiten unter 100 km/h [GSS11; Sch12]. Bei höheren Geschwindigkeiten nehmen Wind- und Abrollgeräusche stark zu, sodass das Fahrgeräusch wieder einem herkömmlichen Fahrzeug gleicht. Es ist wünschenswert, den Betrieb des Range Extenders so zu gestalten, dass die

Wahrnehmung des Range-Extenders durch Luft- und Körperschall auf ein Mindestmaß reduziert wird. Dazu wurde in [GSS11] die Idee eines geschwindigkeitsabhängigen Betriebs für Range Extender vorgestellt. Bei diesem ist der Verbrennungsmotor bis 30 km/h nicht aktiviert. Erhöht sich die Geschwindigkeit weiter, folgt die Aktivierung des Range-Extenders, wobei dessen Drehzahl analog zu dem Fahrgeräusch mit steigender Geschwindigkeit erhöht wird. Eine solche Lösung kann durch eine entsprechende Betriebsstrategie verwirklicht werden.

Eine Bewertung und Optimierung der Geräuschemissionen war im Projekt nicht vorgesehen und wurde daher nicht durchgeführt.

Emissionsgrenzen

Ständig steigendes Verkehrsaufkommen in Großstädten und die damit einhergehende Belastung der Bewohner durch Abgasemissionen, machen schärfere Gesetzgebungen nötig. Als typische Komponenten des Abgases werden Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x), Formaldehyd (FH) und Feinstaub (PM=Partikelmasse, PN=Partikelanzahl) definiert. Die Grenzwerte werden durch die Nation festgelegt, in der das Fahrzeug zugelassen wird. Infolge der Förderung des Projekts durch die Bundesrepublik Deutschland, werden Emissionsgrenzen anderer Nationen vernachlässigt. Die Erhebung der Werte findet anhand von Fahrzyklen bei definierten Umgebungsbedingungen statt und ist unter anderem von der Hybridisierung, der Art des Verbrennungsmotors und der Fahrzeugklasse abhängig.

In der europäischen Union gilt für typgenehmigte Fahrzeuge nach dem 1. September 2011 die Euro 5b Regelung, welche am 1. September 2014 durch die Euro 6b abgelöst wurde. Diese soll am 1. September 2017 durch die Euro 6c ersetzt werden. In Tabelle 3 finden sich die Emissionsgrenzwerte für einen typischen Personenkraftwagen.

Tabelle 3: Emissionsgrenzwerte in der Europäischen Union [EWG07]

Emissionen	Einheit	Euro 5b	Euro 6b	Euro 6c	Euro 5b	Euro 6b	Euro 6c
Verbrennung	-	Fremdzündung			Selbstzündung		
Testprozedur	-	NEFZ	NEFZ	WLTP, RDE	NEFZ	NEFZ	WLTP, RDE
THC	mg/km	100	100	100	-	-	-
NMHC	mg/km	68	68	68	-	-	-
NO _x	mg/km	60	60	60	180	180	80
HC+NO _x	mg/km	-	-	-	230	230	170
CO	mg/km	1000	1000	1000	500	500	500
PM	mg/km	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
PN	1/km	-	6*10 ¹¹				

Neben der Verringerung der Schadstoffbelastung spielt die Reduzierung des Kohlendioxid-ausstoßes eine zentrale Rolle für die zukünftige Entwicklung von Fahrzeugen. Kohlendioxidemissionen besitzen bei vollständiger Verbrennung eine direkte Abhängigkeit zum Kraftstoffverbrauch. Die verpflichtende Zielvorgabe der Europäischen Union legt für 2015 eine Flottenemission von 130g/km fest. Bis 2020 soll dieser Wert auf 95g/km gesenkt werden, wobei eine weitere Absenkung in den Folgejahren wahrscheinlich ist. Bei Überschreitung dieses Wertes sind pro 1g/km bis zu 95€ pro Fahrzeug von den Herstellern aufzubringen. Da hochmotorisierte Fahrzeuge in der Regel einen hohen Kohlendioxid ausstoß besitzen, sind von dieser Regelung Hersteller von Premium- und Sportfahrzeugen besonders betroffen.

Umgebungsbedingungen

Für die Untersuchungen in diesem Projekt werden als Einsatzort des Fahrzeugs Europäische Straßen angenommen. Diese werden nach international vereinbarten Abkommen gebaut [Eco08]. Die Umgebungsbedingungen des Fahrzeugs sind damit klar festgelegt.

Fahrleistung

In diesem Abschnitt wird bestimmt, welche Leistung ein Range Extender Aggregat besitzen muss, um die Erwartungen des Kunden zu erfüllen.

Aufgrund des Anspruchs von BMW Kunden an das dynamische Verhalten von Fahrzeugen sollte mit der maximalen Ausgangsleistung des Range Extender Moduls eine Dauerreisegeschwindigkeit von mindestens 100 km/h ermöglicht werden. Eine andere Auslegung wurde in [Sch12] zur Berechnung der Leistungsanforderung des Range Extenders verwendet. Dort wird eine Dauerreisegeschwindigkeit von 130 km/h gewählt, was im Sinne des Umweltschutzes zu hoch angesetzt ist.

Laut dem European Agreement On Main International Traffic Arteries (AGR) [Eco08] liegt die maximale Steigung für Straßen, die für 100 km/h ausgelegt sind, bei 6 %.

Die nötige Leistung des Range Extender Moduls für den E82e kann man aus der vereinfachten Fahrleistungsgleichung [Mis08]

Formel 7:
$$P_e = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A_{\text{Front}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot v^3 + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot v + \cos(\alpha) \cdot f_r \cdot m \cdot g \cdot v$$

P_e	Fahrleistung des Antriebs
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
A_{Front}	projizierte Frontfläche
ρ_{Luft}	Dichte der Luft
v	Fahrzeuggeschwindigkeit (hier auch Anströmgeschwindigkeit)
m	Gesamtmasse des Kfz
g	Erdbeschleunigung
α	Steigungswinkel
f_r	Rollwiderstandsbeiwert

berechnen. Nimmt man für den jeweiligen Betriebspunkt einen Wirkungsgrad der Antriebsmotoren von 90 % an, ergibt sich eine notwendige elektrische Dauerleistung von 45kW für den Range Extender. Durch den Wirkungsgrad des Generators von ebenfalls ca. 90 % ergibt sich daraus eine notwendige effektive Leistung des Verbrennungsmotors von ca. 50kW.

Antriebsstrangkomponenten

Im Rahmen des Projekts ist als Versuchsträger ein reines Elektrofahrzeug vom Typ BMW E82e (activeE) geplant, das als Vorlage für die Modellierung herangezogen wird. Dieses Modell wird um ein serielles Range-Extender-Modul erweitert.

Range Extender

Am Lehrstuhl Verbrennungsmotoren wurde im Projektverlauf ein validiertes Modell des Range Extender Verbrennungsmotors entstehen. Daher wurde am Beginn der Arbeitsphase eine Marktrecherche nach verfügbaren Range-Extender-Modulen durchgeführt.

Verschiedene Hersteller in der Automobilzulieferindustrie entwickeln derzeit Demonstratoren und Prototypen für Range-Extender-Module. Die gefundenen Produkte sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Bei den Motoren handelt es sich zum Großteil um Ottomotoren. Als einzige Ausnahme ist der Range Extender von Steyr Motors zu erwähnen, dessen erweitertes Einsatzgebiet als Hilfsaggregat für Militärfahrzeuge eine Auslegung als Vielstoffdieselmotor zulässt.

Ein Erwerb der gefundenen Module ist zwar teilweise möglich, jedoch durch die frühe Produktphase weit über einem Serienpreisniveau, sodass dieser nicht durch Projektmittel gedeckt werden kann.

In der Tabelle ist ebenfalls zu erkennen, welche Werte die Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs für die angegebenen elektrischen Dauerleistungen bei einem angenommenen Wirkungsgrad des Antriebsaggregats η_{Antrieb} von 90 % der einzelnen Aggregate annimmt.

Die in Kapitel 0 geforderte Dauerreisegeschwindigkeit von 100 km/h bei einer Steigung von 6 % kann mit keinem der Aggregate erreicht werden.

Die Masse der meisten Aggregate liegt bei etwa 60 kg. Allein der dieselebetriebene Range Extender der Firma Steyr hat technologiebedingt eine deutlich höhere Masse. Zur Erfüllung des Kriteriums eines möglichst geringen Gewichts, ist ein Ottomotor die sinnvolle Wahl.

Tabelle 4: Marktübersicht Range Extender Module

Hersteller/ Bezeichnung	elektr. Dauer- leistung in kW	Gesamtmasse in kg	max. Geschwindigkeit des E82e bei max. Leis- tung bei Steigung 0 / 6 % in km/h	Quelle
Brusa/Swissauto REX eQMotion	30	55	135 / 68	[BRU12]
Steyr Motors Biodiesel Range-Extender	25	<125	125 / 58	[STE12]
MAHLE Powertrain Mahle Range Extender	30	65	135 / 68	[Bis11]
FEV/KSPG -	30	62	135 / 68	[And12]
Lotus Engineering -	35	56	143 / 77	[Lot12]
Getrag-Ford Transmissions Boosted Range Extender	14	-	98 / 34	[HHB11]

Zu dem Kriterium NVH (engl.: „Noise, Vibration, Harshness“, deutsch: „Geräusch, Vibration, Rauheit“, Schallemissionen) ließen sich keine genauen Angaben finden. Infolge einer Verbrennung mit geringen Druckgradienten, erzeugt ein Ottomotor geringere Schallemissionen als ein Dieselmotor, was besonders bei niedrigen Lasten wahrnehmbar auffällt [Sch12]. Aus diesem Grund wird ebenfalls die ottomotorische Verbrennung bevorzugt.

Die Akzeptanz eines Range Extenders bei den Fahrzeugherstellern ist in besonders hohem Maße von den Kosten abhängig. Durch eine höhere Bauteilanzahl und höhere Festigkeit der Bauteile verursacht ein dieselmotorischer Antrieb höhere Kosten, wodurch der Ottomotor ebenfalls begünstigt wird.

Weitere Untersuchungen sind in [Tsc11] nachzulesen. Dort wird der Otto-Viertaktmotor derzeit als sinnvollste Lösung für Range Extender Konzept gesehen.

Sollte es in Zukunft möglich sein, günstig Brennstoffzellenantriebe zu produzieren und diese zuverlässig und sicher zu betreiben, stellt diese Technologie vor allem unter dem Gesichtspunkt NVH eine interessante Alternative dar.

Eine Weiterentwicklung des gängigen Verbrennungsmotors stellt der technologisch anspruchsvolle Linearkolbengenerator dar. Dieser ist Teil aktueller Forschungsvorhaben

[Spo13] und könnte bei geringerem Bauraum und höherer Effizienz elektrische Energie bereitstellen.

Auswahl des Verbrennungsmotors

Für die Betrachtung thermodynamischer Vorgänge ist vor allem eine detaillierte Modellierung des Verbrennungsmotors im Arbeitspaket wichtig. Da eine Beschaffung eines kompletten Range-Extender-Moduls, wie oben beschrieben, nicht möglich war, wird für diese Arbeit ein vorhandener direkteinspritzender 3-Zylinder Saugmotor [Guh11] für den Einsatz als Range Extender angepasst. Der Versuchsträger besitzt 1,0 Liter Hubraum und eine maximale effektive Leistung von ca. 45kW. Der Motor besitzt die Eigenschaft, dass er über ein frei programmierbares Steuergerät verfügt und entsprechende Variabilität zur Optimierung als Range Extender besitzt. Geringe Masse, geringe Abgasemissionen und geringe NVH-Werte qualifizieren den Motor für die Anwendung.

Die ebenfalls zum Range-Extender-Modul gehörende elektrische Maschine und die Leistungselektronik werden modelliert, allerdings nicht experimentell untersucht. Anders verhält sich dies mit der Analyse des Verbrennungsmotors. Aufgrund einer Vielzahl von Einflussfaktoren ist eine Simulation mit realistischen Ergebnissen nur mit umfangreichen Untersuchungen an einem Motorprüfstand zu erstellen.

AP 2.1.2 Klassifikation von Kundenprofilen und Use Cases

Im Teilarbeitspaket Klassifikation von Kundenprofilen und Use Cases (Anwendungsfälle) sollen die Randbedingungen für die zu entwickelnde Betriebsstrategie erarbeitet werden. Es handelt sich um die Einsatzbereiche des Fahrzeugs, welche durch die Betriebsstrategie abgedeckt werden müssen.

Eine entworfene Betriebsstrategie ist im Idealfall in jeder Situation optimal energieeffizient. Die Betrachtung von Use Cases ist daher nur sinnvoll, wenn regelbasierte, d.h. bestenfalls suboptimale Strategien eingesetzt werden. Dennoch kann der Nachweis der Güte einer optimalbasierten Betriebsstrategie dadurch erbracht werden, dass unterschiedliche Fahrprofile simuliert werden, für die ein Vergleich zwischen optimaler Lösung und entwickelter Betriebsstrategie berechnet wird. Mit Fahrprofilen sind Antriebsmomentverläufe (bzw. Geschwindigkeits- und Steigungsverläufe) für verschiedene Fahrertypen und bei unterschiedlichen Umweltbedingungen gemeint.

Klassifikation von Fahrern

In [May04], [Sac08] und [Ebe05] wurde Literatur zur Klassifizierung von Fahrern ausgewertet. Dort werden Verfahren erwähnt, die den Fahrertyp ohne Messdaten aufgrund der Selbsteinschätzung der Fahrer oder der Einschätzung des Versuchsleiters bestimmen. Außerdem existieren qualitative Zusammenhänge zwischen Fahrertyp und erreichter Quer- bzw. Längsbeschleunigung. Diese Zusammenhänge werden für die Unterteilung in Fahrertypen im Projekt genutzt.

Die Klassifizierung wird nach Aufnahme mehrerer Messfahrten für eine Strecke mit der Verteilung der Quer- bzw. Längsbeschleunigung getroffen. Die Einteilung erfolgt in die Kategorien

- entspannter Fahrer,
- normaler Fahrer und
- sportlicher Fahrer.

Mit dieser Klassifikation können in Folgeuntersuchungen dann weitere Verfeinerungen der Betriebsstrategie vorgenommen werden, die sich dann z.B. auf den Fahrer anpassen kann. Diese Thematik besitzt jedoch eher eine Zugehörigkeit zur Prädiktionshorizonterstellung, d.h. der Geschwindigkeitsvorgabe und wird daher hier nicht weiter betrachtet, da dieses Thema im Verbundprojekt von anderen Instituten bearbeitet wird.

Klassifikation von Umweltbedingungen

Neben verschiedenen Fahrern verursachen auch Umweltbedingungen wie Straßenzustand, Witterung oder Verkehr unterschiedliche Antriebsmomentverläufe. Bei der Durchführung von Versuchsfahrten werden daher die verschiedenen Einflussfaktoren berücksichtigt:

- Temperatur
- Straßenzustand
- Verkehrsdichte

Die Verkehrsdichte kann nur subjektiv durch denjenigen, der den Versuch durchführt, bestimmt werden, da konstante Messungen während der Fahrt nicht zu realisieren sind. Der Straßenzustand lässt sich ebenfalls nur schwer bestimmen, kann allerdings über den Rad-schlupf quantifiziert werden.

Definition von repräsentativen Kunden- und Fahrprofilen

Zur Aufzeichnung von repräsentativen Fahrprofilen ist eine lokale Strecke nötig, die möglichst alle Straßenkategorien mit gleichem Anteil enthält.

Der im Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik etablierte Zyklus erfüllt diese Anforderung sehr gut. Der Verlauf der Strecke ist in Abbildung 35 dargestellt. Im weiteren Verlauf des Berichts, wird dieser Zyklus als „Dresden Zyklus“ bezeichnet. Er zeichnet sich durch etwas gleich große Anteile Autobahn, Überland und Stadt aus und ist daher geeignet Betriebsstrategien realistisch zu überprüfen.



Abbildung 35: Darstellung des verwendeten Fahrzyklus (erstellt mit [Gau13])

Neben dem dargestellten Dresden Zyklus wurde auch der NEFZ zur Validierung der Ergebnisse verwendet.

Klassifikation von Verbrennungsmotor- und Nebenaggregatbelastungen

Die Belastung des Verbrennungsmotors ergibt sich aus der Ansteuerung durch die Betriebsstrategie. Da es sich um einen seriellen Range Extender handelt, steht für den reinen Fahrzeugantrieb nur die E-Maschine des BWM activeE zur Verfügung. Die dafür benötigte Energie wird im Normalfall aus der Fahrzeugbatterie bezogen. Einzig bei laufendem Range Extender Modul wird die erzeugte Energie direkt genutzt, um zusätzliche Wandlungsverluste zu vermeiden. Für den als Range-Extender fungierenden Verbrennungsmotor ergibt sich daher die Hauptbelastung aus dem Ladezustand der Fahrzeugbatterie. Hierbei werden neben konstanten Betriebspunkten bei verschiedenen Motordrehzahlen und -leistungen auch fahrgeschwindigkeits- oder steigungsabhängige Motorleistungen bzw. -drehzahlen angestrebt. Als einziges Nebenaggregat des Range Extenders ist eine Kühlmittelpumpe mit elektrischem Antrieb vorgesehen. Dadurch wird ein bedarfsabhängiger und von der Motordrehzahl unabhängiger Austausch von thermischer Energie zwischen Range Extender Modul und Fahrzeug möglich. Inwieweit dadurch Effizienzsteigerungen durch ein Vorwärmen des Moduls oder Komfortsteigerungen infolge Abwärmenutzung des REX erzielt werden können, ist Gegenstand von AP 2.1.4 und AP 2.1.5.

AP 2.1.3 Methoden eBGS & stufenweise Abstrahierung von Streckendaten

Die in diesem Kapitel vorgestellten Methoden stellen den Kern des Arbeitspakts dar. Es werden aufeinander aufbauend verschiedene Betriebsstrategien erstellt und miteinander verglichen. Der Vergleich ist im AP 2.1.6 dargestellt.

Einführung

Während konventionelle Fahrzeuge auch ohne eine Betriebsstrategie auskommen, ist diese für Hybridfahrzeuge, die mindestens zwei Energiewandler besitzen, zwingend erforderlich. Die Betriebsstrategie bestimmt unter der Beachtung verschiedener Kriterien, wie viel jeder einzelne Energiewandler zur geforderten Fahrleistung beiträgt. Die Kriterien z.B. Kraftstoffverbrauch oder Emissionen sollen ein Optimum erreichen, d.h. laut [FR94: S. 11] so gut verhalten, wie es unter den gegebenen Bedingungen möglich ist. Für Betriebsstrategien gibt es zwei generelle Ansätze: regelbasierte Betriebsstrategien, die heuristisch durch den Entwickler erstellt werden, und optimalitätsbasierte Betriebsstrategien, die Verfahren der Optimalen Steuerung nutzen [Kut12]. Auf dem zuletzt genannten Verfahren liegt der Schwerpunkt in diesem Projekt, da nur dieses eine global optimale Ansteuerung gewährleistet oder dieser sehr nahe kommen (Suboptimalität), während man bei heuristischen Strategien mathematisch keinen Beweis der Optimalität erbringen kann.

Grundlagen der Variationsrechnung

Der Optimierung liegt immer ein Gütemaß zugrunde. Dieses stellt ein Maß der Qualität einer Systemgröße dar. Die Optimierung besteht darin, dieses Maß durch geeignete Wahl der Systemparameter zu minimieren oder zu maximieren. [FR94: S. 12].

Das Finden einer Funktion welche eine bestimmte Größe, das Gütemaß, minimiert oder maximiert, stellt ein Optimierungsproblem der Variationsrechnung dar. Wie in [FR94: S. 12] erwähnt, genügt eine Beschränkung auf zu minimierende Probleme. Maximierungsaufgaben können durch Vorzeichenumkehr in diese gewandelt werden.

Aus der Variationsrechnung werden in diesem Projekt zwei Methoden angewendet. Zum einen wird das Maximumprinzip von Pontrjagin zur Entwicklung einer onlinefähigen Betriebsstrategie, der Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS), angewendet. Zum anderen wird die von Richard Bellman eingeführte Dynamische Programmierung zur Ermittlung einer optimalen Referenzlösung genutzt [Lar14]. Beide Methoden wurden bereits gründlich in der Veröffentlichung [Ueb14] vorgestellt, weswegen auf eine genauere Darstellung hier verzichtet wird.

Struktur der Betriebsstrategie

Wie erwähnt, nutzt die onlinefähige Betriebsstrategie als Basis die ECMS. Ihr genereller Ablauf ist in Abbildung 36 dargestellt. Aus den Prädiktionsdaten wird adaptiv über eine modellprädiktive Iteration (siehe GPO in [Ueb14]) der Äquivalenzfaktor λ so bestimmt, dass zum Ende der Fahrt ein gewünschter Zielladezustand der Batterie erreicht werden kann.

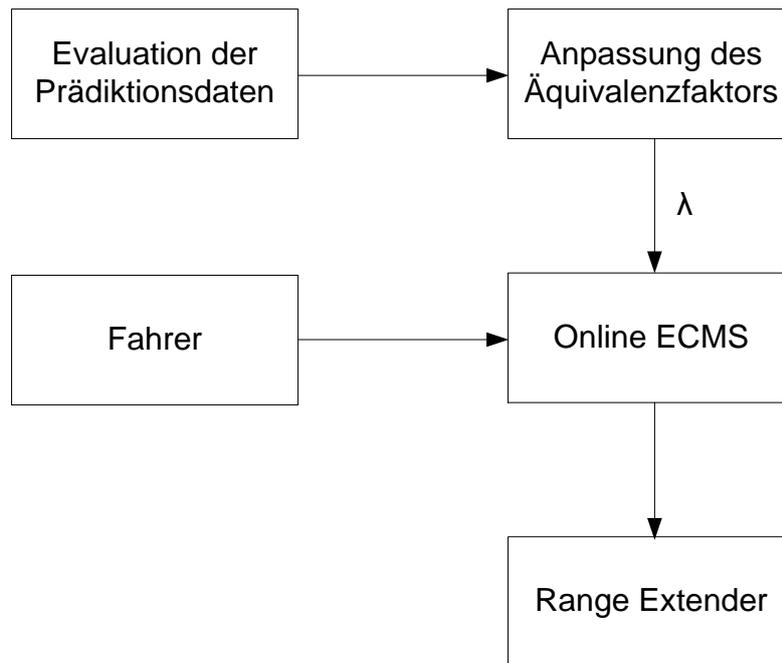


Abbildung 36: Struktur der Betriebsstrategie

Der berechnete Äquivalenzfaktor gilt als Eingang der ECMS, die aus dem Fahrerwunsch die Ansteuerung des Range Extenders wählt, welche die geringste äquivalente Leistung

Formel 8:
$$\vec{P}_{\text{äqui}} = \vec{P}_{\text{Krst}} + \vec{P}_{\text{inner}} \cdot \lambda$$

ergibt. P_{Krst} ist dabei die Kraftstoffleistung und P_{inner} die innere Batterieleistung. Dabei wird über Straffaktoren sichergestellt, dass neben dem Arbeitspunkt auch der Motor-Start-Stopp-Zustand des Range Extenders möglichst optimal gewählt wird.

AP 2.1.4 Simulation Emission und thermische Randbedingungen

Für die in AP 2.1.3 beschriebene Optimierungsstrategie ist eine umfangreiche Datenbasis notwendig, welche aus experimentellen und theoretischen Untersuchungen gewonnen wird. Die Ergebnisse dienen schließlich zur Ableitung eines einfachen und ressourcenschonenden Motormodells, welches in die vorgestellte ECMS-Streckenoptimierungsstrategie integriert werden kann. Somit ist eine Prädiktion des Wärmemanagements, Kraftstoffverbrauchs und Emissionsverhaltens möglich.

Zunächst erfolgte der Aufbau eines nicht aufgeladenen Ottomotors an einem klimatisierten Motorenprüfstand. Der Verbrennungsmotor besitzt einen Hubraum von 1,0 Liter, drei Zylinder und verstellbare Ladungswechselorgane. Bei einer Motordrehzahl von 5000 min^{-1} wird eine effektive Leistung von 45kW erreicht. Alle Betriebsparameter können unter Zuhilfenahme eines frei programmierbaren Steuergeräts verändert werden. Um einen Betriebszustand einzustellen, werden dem Verbrennungsmotor eine definierte Last und die Drehzahl der elektrischen Bremse vorgeben. Die Lastanforderung erfolgt mittels einer Hardware-in-the-loop Regelung (HiL), welche grundlegend für reproduzierbare Versuche ist. Messtechnik, die unter anderem zur Charakterisierung der Abgaszusammensetzung vor

und nach Katalysator, des Kraftstoffverbrauchs und des thermischen Zustand des Verbrennungsmotors und der thermodynamischen Verhältnisse im Brennraum dient, wurde installiert. Die Daten werden auf einem automatisierten computerbasierten Messsystem gespeichert und ausgewertet.

Im Verlauf des Messprogramms wurden verschiedene Versuche getätigt. Zunächst erfolgte die Vermessung des Verbrennungsmotors in stationärem Betriebszustand. Exemplarisch zeigt sich in Abbildung 37 der Kraftstoffverbrauch bei betriebswarmem Motor in Abhängigkeit von Drehzahl und Last. Die Last wird durch die Größe effektiver Mitteldruck p_{me} beschrieben. Es handelt sich um eine spezifische Größe, welche den Hubraum V_H des Verbrennungsmotors egalisiert und eine proportionale Abhängigkeit zum abgegebenen Drehmoment M_{eff} herstellt.

Formel 9:
$$p_{me} = \frac{4\pi M_{eff}}{V_H}$$

Der energetisch optimale Betriebszustand befindet sich bei einer Drehzahl von 2100 min^{-1} und einer Motorleistung von $18,0 \text{ kW}$.

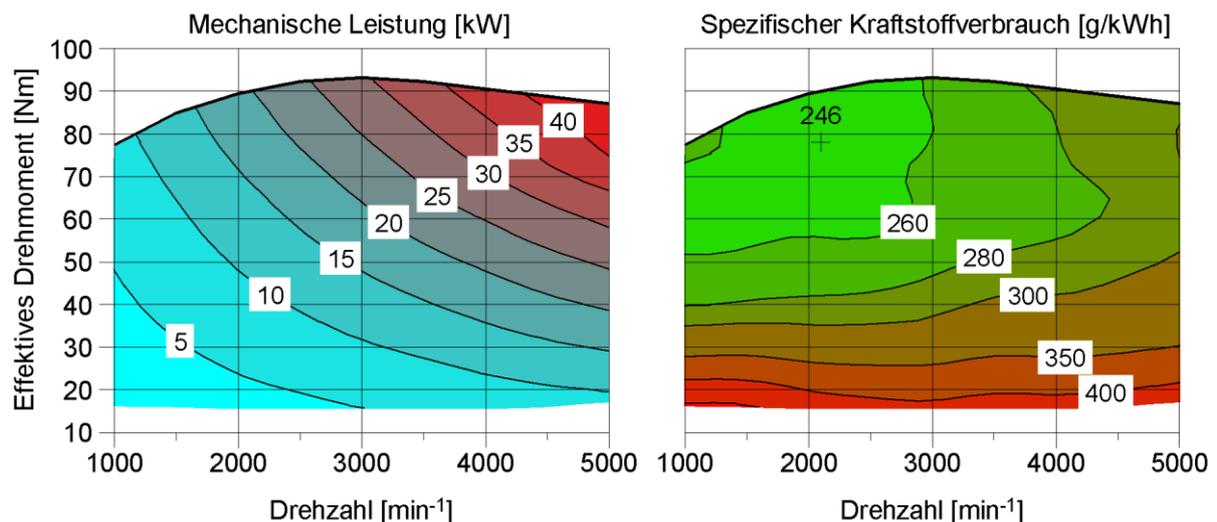


Abbildung 37: Spezifischer Kraftstoffverbrauch bei stationärem Betrieb

Unter Berücksichtigung der Kühlmitteltemperaturen und -volumenströme, sowie des Luftverhältnisses lässt sich eine Energiebilanz unter stationären Bedingungen aufstellen (Abbildung 38). Es zeigt sich, dass die Kraftstoffenergie in vier Komponenten umgewandelt wird.

1. Mechanische Antriebsleistung
2. Abgasenthalpie
3. Kühlmittelenthalpie, inklusive Wärmeverluste an der Motoroberfläche
4. Chemische Verluste durch unvollständige Verbrennung

Im Fall transienter Bedingungen ist die Temperaturänderung der Wärmekapazitäten von Motorbauteilen und Betriebsmitteln zu berücksichtigen, so dass sich noch eine weitere Komponente ergibt.

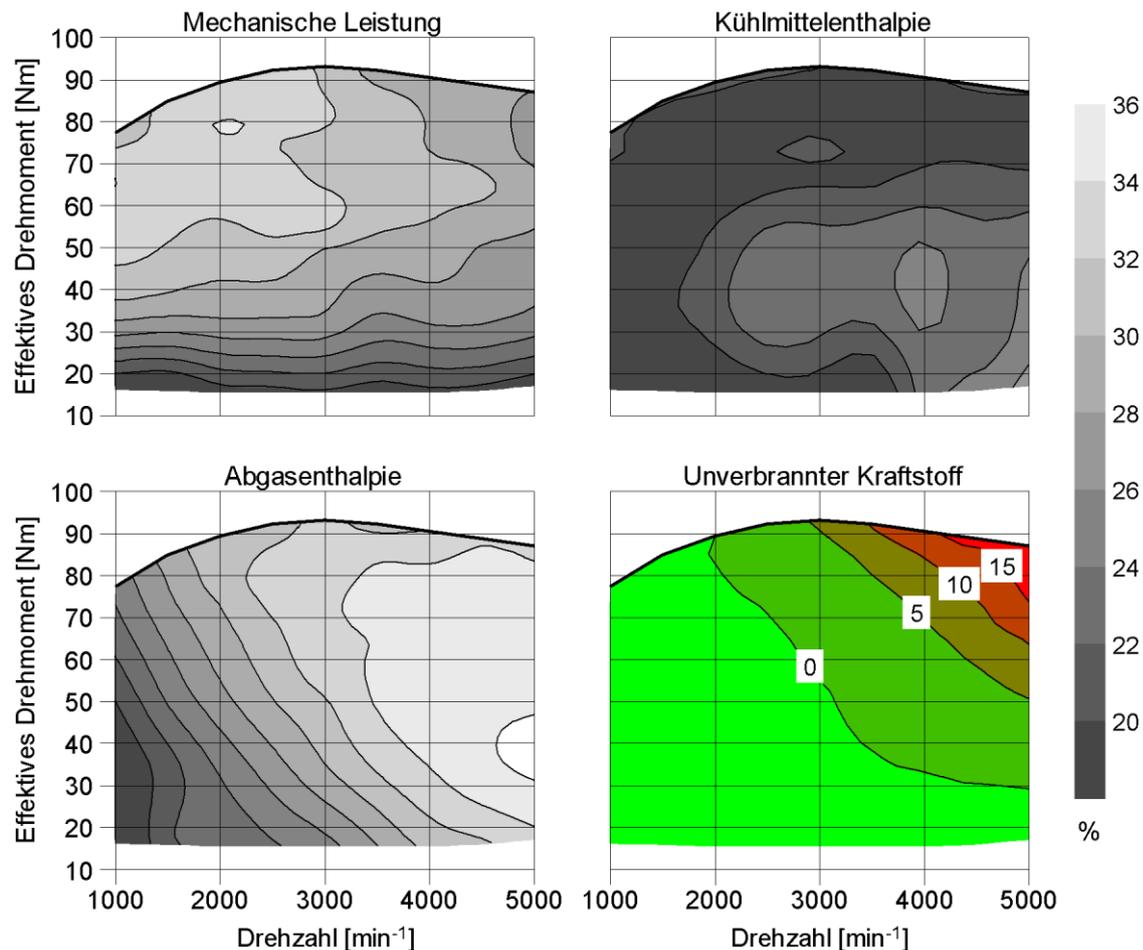


Abbildung 38: Energiebilanzierung in stationären Lastpunkten

Weiterhin wurden Kaltstartversuche durchgeführt, um Einflussgrößen für einen möglichst verbrauchs- und emissionsarmen Betrieb zu finden. Eine Bestimmung der Konvertierungsrate des Katalysators war für die Lösung dieser Aufgabe maßgebend. Um Verschleiß und zu hohen Abgasemissionen vorzubeugen, ist beim Kaltstart ein Lastpunkt anzufahren, welcher den Katalysator schnell erwärmt. Somit lassen sich die Abgasemissionen reduzieren, während elektrische Leistung abgegeben wird. Bei zu hoher Motorleistung steigen die Abgasemissionen infolge des erhöhten Abgasmassestroms an, bei zu niedriger Motorleistung wird der Warmlauf verlängert und wenig elektrische Leistung zur Verfügung gestellt.

In Abbildung 39 sind die Konvertierungsrate und die Temperaturen des Katalysators nach einem Kaltstart dargestellt. Es zeigt sich, dass zunächst der Lastpunkt 1500 min^{-1} bei einer Motorleistung von 5 kW angefahren wird, bevor nach etwa 215 s der Bestpunkt mit einer Drehzahl von 1500 min^{-1} und 18 kW Motorleistung eingestellt wird. Die Reduzierung der Konvertierungsrate von Kohlenmonoxid bei der Lastaufschaltung unterstreicht die Wichtigkeit eines vollständig durchgewärmten Katalysators.

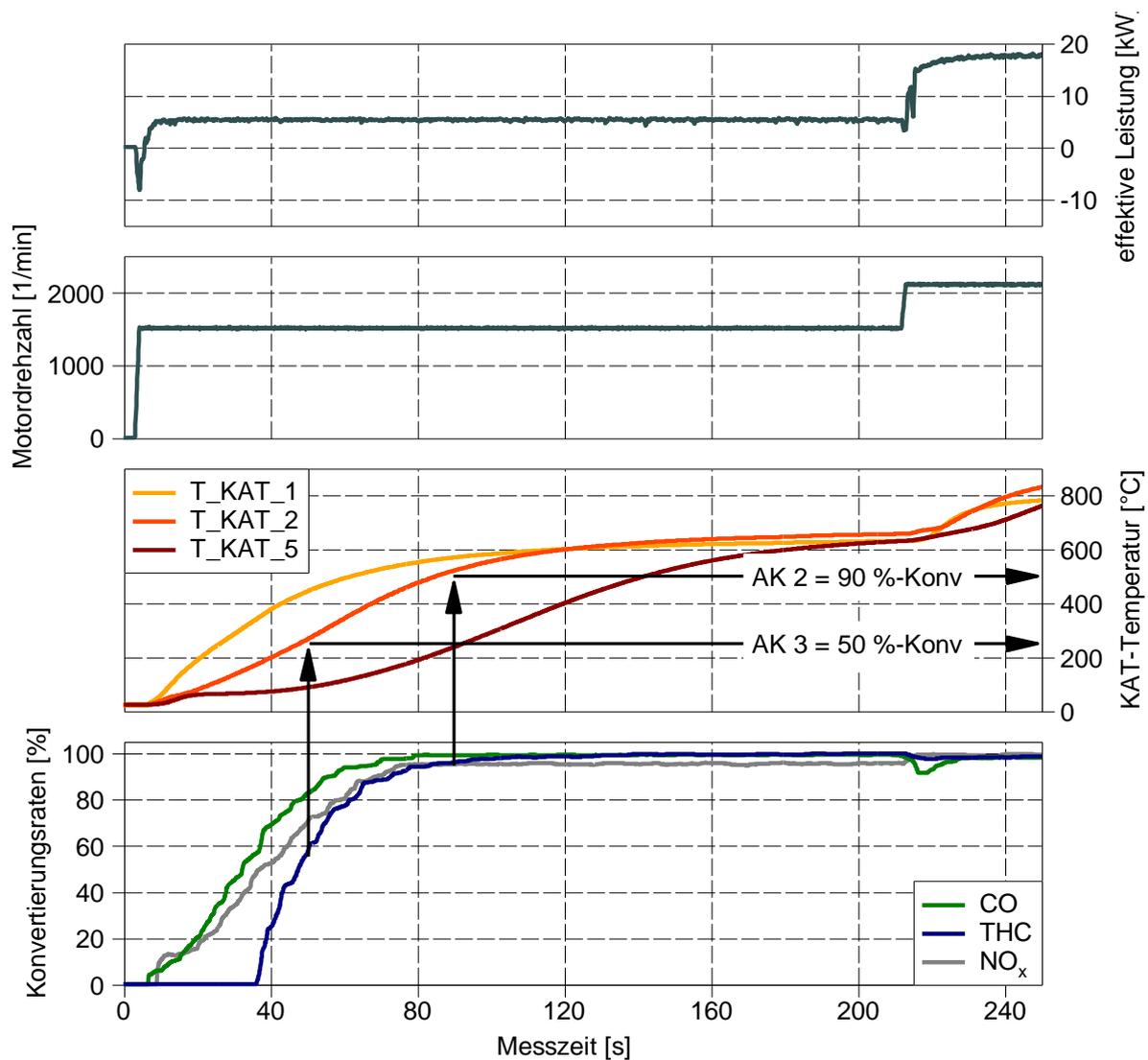


Abbildung 39: Konvertierung Katalysator nach Kaltstart

Viele Mechanismen innerhalb des Verbrennungsmotors sind messtechnisch schwer zu erfassen. Durch ein komplexes eindimensionales Simulationsmodell können weitere Optimierungspotentiale abgebildet und Variationen durchgeführt werden. Dieses umfasst die Berechnung des Brennverlaufs, des Ladungswechsels, der Reibung, der Erwärmung bzw. Abkühlung sowie der Emissionentstehung und -konvertierung. Für weitere Analysen, wie sie bei der Nutzung der Abgasenthalpie zur Komfortverbesserung nötig wären, ist die Komplexität des Berechnungsmodells nötig, um Rück- und Wechselwirkungen festzustellen. Infolge dieser Komplexität ergibt sich eine hohe Berechnungsdauer, weswegen das Modell für weitreichende Optimierungsaufgaben begrenzt geeignet ist. Es besteht darum die Möglichkeit, das Modell in mehrere Teilmodelle zu zerlegen, sodass eine lokal begrenzte Optimierung von Bauteilen und Betriebsstrategien mit hoher Zeiteffizienz durchgeführt werden kann.

Am Beispiel der Abgasemissionen in der Volllast zeigt sich eine weitestgehend gute Übereinstimmung zur Messung, weswegen das Modell zur Erzeugung weiterer Daten herangezogen wird (Abbildung 40).

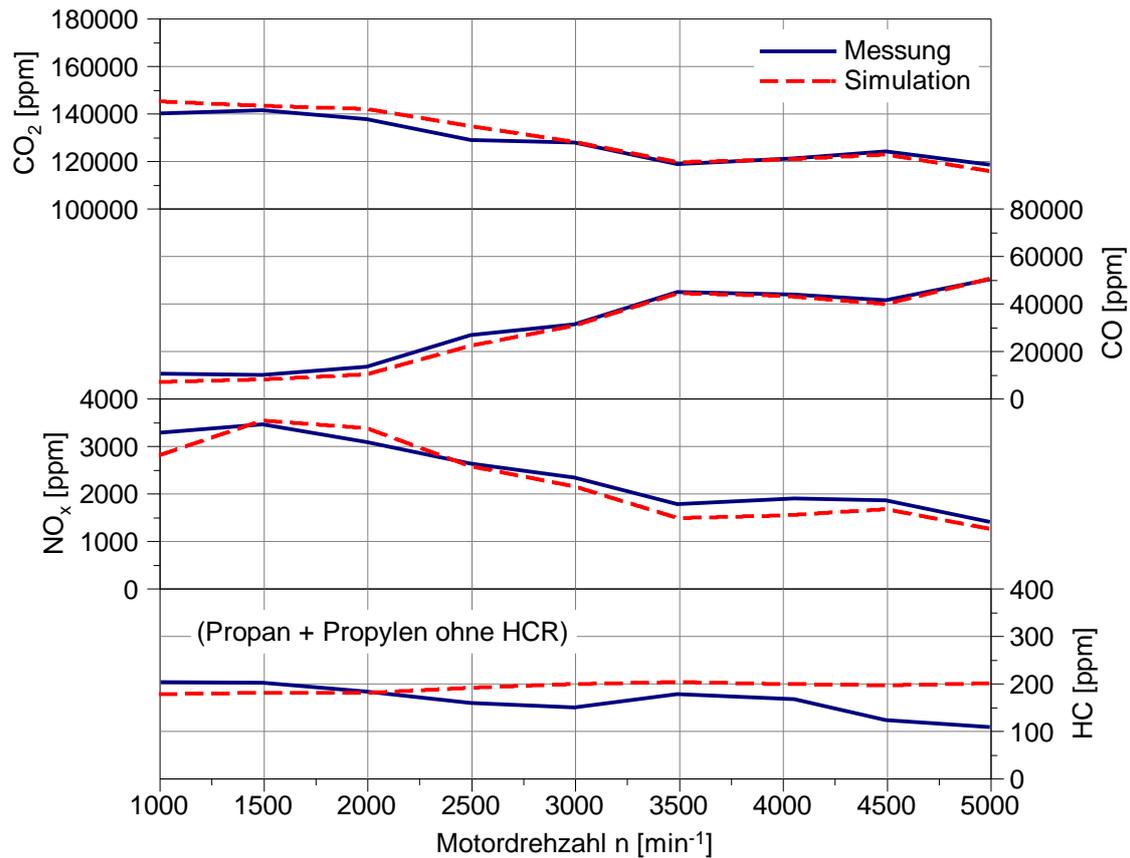


Abbildung 40: Simulation der Abgasemissionen

Die Summe der Ergebnisse aus Messung und Berechnung dienen zur Bedatung des bereits erwähnten, mittelwertbasierten Berechnungsmodells, welches in die Optimierungsstrategie integriert wird (Abbildung 41). Dieses Modell basiert größtenteils auf Kenndaten und Kennfeldern, welche mit einfachen physikalischen und mathematischen Berechnungen verknüpft sind.

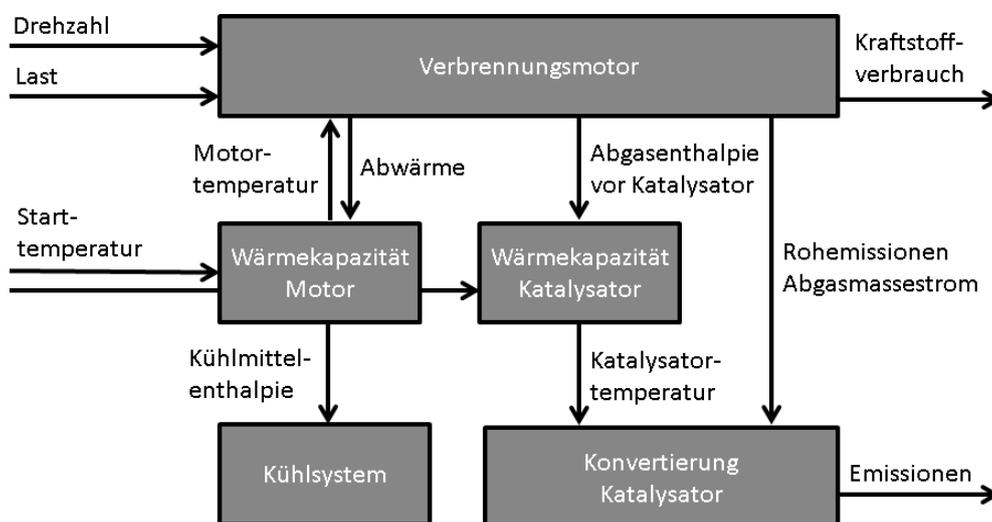


Abbildung 41: Konzept des mittelwertbasierten Verbrennungsmotormodells

AP 2.1.5 Simulation Energieverbrauch Gesamtfahrzeug

Im Rahmen des Arbeitspakets ist es zur Validierung der Betriebsstrategie nötig, ein Fahrzeugmodell zu erstellen. Mit Hilfe des Modells soll der Energieverbrauch des Demonstrators auf die verschiedenen Zyklen abgeschätzt werden. Der Energieverbrauch stellt das Gütemaß dar.

Als Vorlage für das Modell wurde der im Projekt als Demonstrator genutzte BMW E82e (activeE) genutzt und durch ein Range-Extender-Modul ergänzt, welches den untersuchten Verbrennungsmotor enthält.

Die vollständige Modellierung erfolgte mit dem Programm Matlab/Simulink, da es für die Implementierung von Regelungen und Steuerungen Vorteile bietet.

Der activeE

Im Projekt stand als Demonstrator ein BMW E82e, auch activeE genannt, zur Verfügung. Dieser wurde von der Firma BMW ab 2011 für das Studium von Elektrofahrzeugen im Kundenbetrieb genutzt. Es wurden 1000 Stück des activeE produziert. [Arl13] Seine Basis ist das BMW 1er Coupé (E82). Statt des Tanks, der Kardanwelle und des Verbrennungsmotors mit Getriebe wurde eine ca. 320 kg schwere Batterie in das Fahrzeug integriert und ein permanenterregter Synchronmotor mit vergrabenen Magneten und 125 kW Leistung eingebaut. Das Getriebe besitzt eine einfache Übersetzung zwischen Motor und Rad. Zum Crash-Schutz wurde eine ca. 150 kg schwere Stahlkonstruktion hinzugefügt [Arl13]. Durch alle Maßnahmen erhöht sich die Fahrzeugmasse gegenüber eines E82 mit konventionellem Antrieb um etwa 500kg. Die Achslastverteilung des activeE liegt bei 50:50.

Die Batterie besteht aus 192 prismatischen Zellen, die in Kooperation mit SB LiMotive, ein ehemaliges Joint-Venture der Robert Bosch GmbH und Samsung SDI, entwickelt wurden. Die Zellen bestehen aus Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt [Voe10], [Arl13] und [Jun12b] haben Normgröße.

Modellart

Es wurde ein kausal vorwärts gerichtetes Modell abgeleitet. Das heißt, dass z.B. die Beschleunigung des Fahrzeuges eine Folge der auf das Fahrzeug wirkenden Kräfte und dem vom Fahrer gestellten Moment ist. In einem rekursiven Modell würde sich dieses Moment aus der durch einen Fahrzyklus vorgegebenen Geschwindigkeit rückwirkend (rekursiv) ergeben.

Im Falle des vorwärts gerichteten Modells stellt ein Regler, als Modell des Fahrers, die Gas- bzw. Bremspedalstellung ein. Die Geschwindigkeit eines beliebigen Fahrzykluses gilt als Führungsgröße.

Gegenüber rekursiven Modellen entspricht die genannte vorwärts gerichtete Modellierung des Verhaltens eines Testfahrers, wodurch die Vergleichbarkeit von Kraftstoff- und Energieverbräuchen erhöht wird. Weitere Informationen dazu findet man in [Ser09] auf Seite 28.

Modellaufbau

Das Modell besteht aus einer Vielzahl von Teilsystemen, wie man Abbildung 42 entnehmen kann.

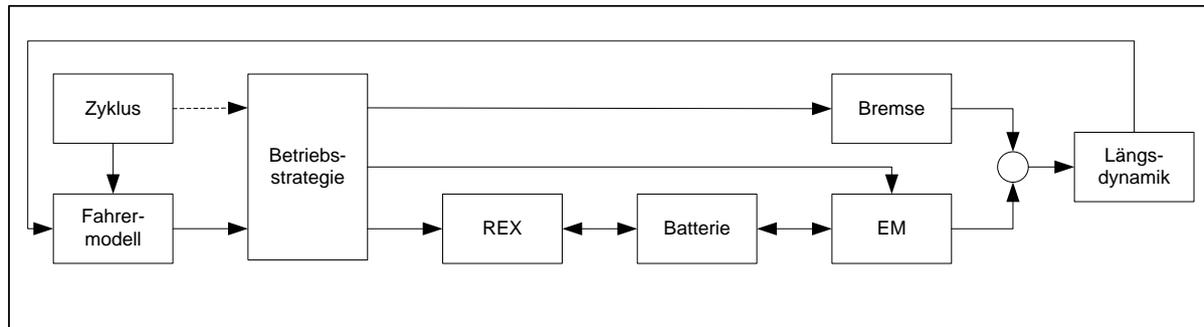


Abbildung 42: Modellstruktur

Zyklus

Wie bereits beschrieben, dient als Führungsgröße des Fahrerreglers die Geschwindigkeit eines wählbaren Fahrzyklus. Dieser enthält zeitdiskret für die Simulationszeit die Geschwindigkeit und wegdiskret die Steigung einer gemessenen oder künstlich erzeugten Fahrstrecke.

Fahrermodell

Das Fahrermodell soll das menschliche Verhalten Einstellen der vorgegebenen Sollgeschwindigkeit eines Fahrprofils nachempfinden. Die genaue regelungstechnische Modellierung des menschlichen Fahrverhaltens ist sehr komplex und vereint mehrere Forschungsgebiete. Einen Vergleich der verschiedenen Modellierungsmöglichkeiten eines Fahrers findet man z.B. in [Win08].

Da in dieser Arbeit die Anforderung an den Regler ein möglichst genaues Folgen der vorgegebenen Zyklusgeschwindigkeit ist, kann auf die komplexen Ansätze verzichtet werden. Für diese Aufgabe kommt ein PI-Regler mit Anti-Windup Vorrichtung zum Einsatz, wie er in [Ueb10] zur Regelung des Verbrennungsmotormoments verwendet wird. Die Parameter des PI-Reglers wurden mit Hilfe einer iterativen Parametervariation über die „quadratische Regelfläche“ gefunden. [FR94: S. 23 ff.]

Antriebsmotor

Der Elektromotor (EM), der das Fahrzeug antreibt, ist mit Hilfe einer Kennkurve, die das Maximalmoment über der Drehzahl angibt, und eines Kennfeldes, das die aufgenommene bzw. abgegebene elektrische Leistung in Abhängigkeit der Drehzahl und dem Drehmoment angibt, modelliert.

Beim verwendeten Elektromotor handelt es sich um eine permanenterregte Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten. Sie erzeugt ein maximales Drehmoment von 250Nm im Drehzahlbereich von 0 bis 4775 rad/min angegeben. Die Feldschwächebereich des Motors beginnt ab einer Drehzahl von 4775 rad/min, ab der auch die maximale Leistung von 125kW abgegeben werden kann. Das Fahrzeug regelt ab einer Geschwindigkeit von 145 km/h bzw. 12 000 rad/min an der Welle der elektrischen Maschine ab. Im Modell ist diese

Abregelung im Elektromotor realisiert. Ebenso ist das Rekuperationsmoment begrenzt. Der elektrische Antriebsstrang besitzt mindestens einen Wirkungsgrad von 85 % [Jun12b].

Auf die Abbildung des leicht verzögernden Momentenaufbaus des Elektromotors wurde verzichtet, da die Zeitkonstante des PT1-Verhaltens sehr klein wäre und eine solch geringe Frequenz das Modell unnötig verlangsamen würde.

Das modellierte Getriebe, übersetzt die Geschwindigkeit der Räder auf die Geschwindigkeit des Antriebsmotors und das Moment des Antriebsmotors auf die Räder. Es besitzt einen konstanten Wirkungsgrad von 97 %.

Bremse

Die Räder sind mit den Bremsen in einem Block simuliert. Er berechnet aus dem Rekuperationsmoment und dem vom Fahrer gewünschten Moment das anliegende Moment an den Rädern. Über den dynamischen Radhalbmesser wird aus der Fahrzeuggeschwindigkeit die Drehzahl der Räder berechnet. Der Schlupf wird dabei vernachlässigt.

Batterie

Die im Fahrzeug einsetzende Batterie ist ein Lithium-Ionen-Hochvoltspeicher mit einem Nettoenergiegehalt von 28kWh [Jun12b]. Insgesamt besitzt der Speicher 192 Zellen à 40 Ah mit einer Reihenschaltung von jeweils zwei parallelen Zellen. Die Gesamtladung beträgt demnach 80 Ah.

Die Bruttoladung der Batterie liegt bei 32kWh [Jun12a]. Damit ergibt sich eine Nennspannung der Batterie von

Formel 10:
$$\frac{32 \text{ kWh}}{80 \text{ Ah}} = 400 \text{ V}.$$

Mit dieser Batterienennspannung kann man die Zellspannung

Formel 11:
$$\frac{400 \text{ V}}{96} = 4,17 \text{ V}$$

berechnen.

Die Verlustleistung P_{Verlust} der Batterie wird über ein bei betriebswarmer Batterie gemessenes Kennfeld modelliert. Sie hängt bei konstanter Temperatur nur von der Klemmleistung P_{Klemm} der Batterie ab. Aus der Leistungsbilanz lässt sich die innere Leistung der Batterie P_{Inner} ableiten.

Formel 12:
$$P_{\text{inner}} = P_{\text{Klemm}} - P_{\text{Verlust}}(P_{\text{Klemm}}) \text{ mit } P_{\text{Verlust}} > 0 \text{ und } P_{\text{Klemm}} \begin{cases} > 0 & \text{Laden} \\ < 0 & \text{Entladen} \end{cases}$$

Die Ladung der Batterie ergibt sich als Integral über der Zeit

Formel 13:
$$Q(t) = \int \frac{P_{\text{inner}}}{U_0(Q)} dt + Q_0.$$

Im Modell der Batterie wird ein Strombegrenzer durch einen I-Regler abgebildet, der lediglich bei der Überschreitung der Stromgrenzen aktiviert wird. Ein reiner P-Regler würde

regelungstechnisch ausreichen, aber im Modell eine algebraische Schleife verursachen, da auf die Abbildung des PT1-Verhaltens des Elektromotors verzichtet wurde. Allerdings muss das Signal, das den Integrator zurücksetzt, mit einem PT1-Glied verzögert werden, um eine algebraische Schleife zu vermeiden. Dessen Zeitkonstante kann aber deutlich größer gewählt werden, sodass noch eine schnelle Modellberechnung gewährleistet werden kann. Der Verstärkungsfaktor des I-Reglers zur Strombegrenzung wurde iterativ ermittelt.

Fahrzeu glängsdynamik

In dem Modellblock für die Fahrzeu glängsdynamik wird aus der aktuellen Steigung im Fahrzyklus und dem Moment an den Rädern aus den Fahrwiderständen

Formel 14:
$$v = \int \frac{M_{Rad} - \frac{1}{2} c_w \cdot A_{Front} \cdot \rho_{Luft} \cdot v^2 \cdot \text{sgn}(v) - m \cdot g \cdot \sin(\alpha) - f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{sgn}(v)}{m_{Ersatz}}$$

M_{Rad}	Antriebsmoment an den Rädern
m_{Ersatz}	Fahrzeugmasse inkl. Massenzunahme durch die Reduktion der rotatorisch zu beschleunigenden Bauteile
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
A_{Front}	projizierte Frontfläche
ρ_{Luft}	Dichte der Luft
v	Fahrzeuggeschwindigkeit (hier auch Anströmgeschwindigkeit)
m	Gesamtmasse des Kfz
g	Erdbeschleunigung
α	Steigungswinkel
f_r	Rollwiderstandsbeiwert

die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet.

Range Extender

Der Range Extender wird durch das in AP 2.1.4 ermittelte Modell simuliert, das für Drehzahl und geforderte elektrische Leistung einen Kraftstoffverbrauch ausgibt. Unter der Annahme konstanter Motortemperatur lässt sich aus dem Kraftstoffverbrauch und der abgegebenen elektrischen Leistung der Wirkungsgrad berechnen. Das Wirkungsgradkennfeld ist in Abbildung 43 dargestellt.

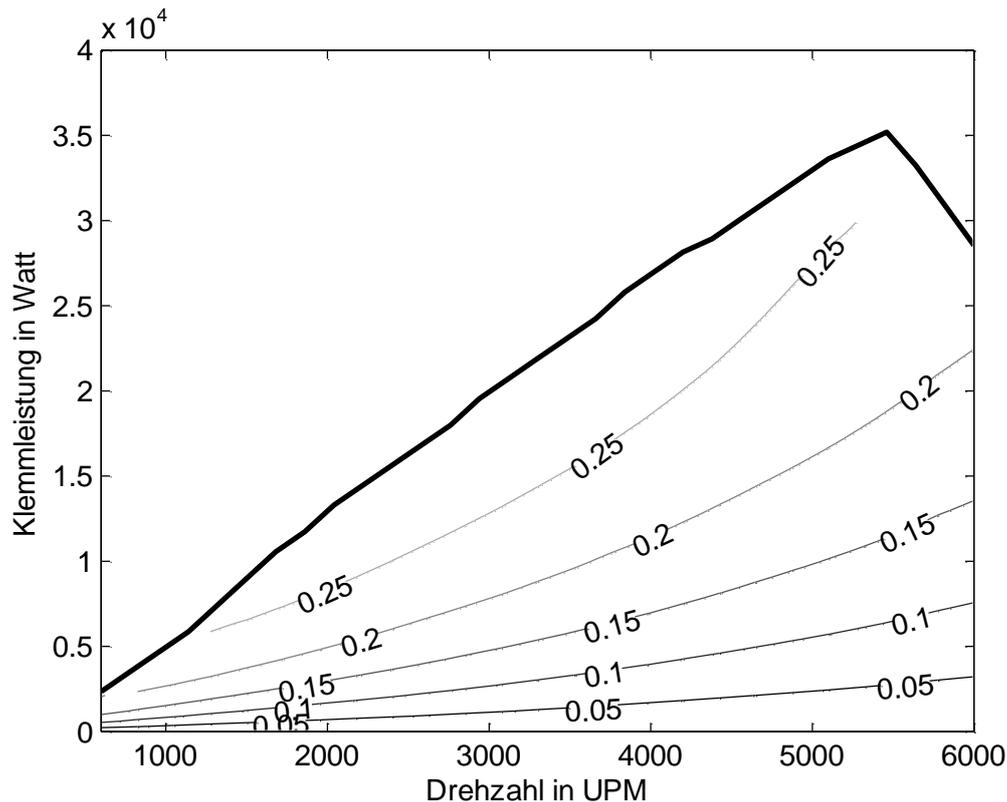


Abbildung 43: Wirkungsgradkennfeld des Range Extender Moduls

Die Berechnung der Abgasemissionen oder des Temperatureinflusses ist ebenso möglich.

Betriebsstrategie

Der Block Betriebsstrategie enthält eine Implementierung der ECMS und des Iterationsalgorithmus für den Äquivalenzfaktor.

Die Umsetzung der Algorithmen ist dabei größtenteils mit Hilfe von Embedded Matlab Functions geschehen. Eine Implementierung per Stateflow wäre auch denkbar.

AP 2.1.6 Test und Validierung

In diesem Arbeitspaket wurden die in AP 2.1.3 entwickelten Betriebsstrategien mit dem Längsdynamikmodell aus AP 2.1.5 validiert.

Vergleich mit Optimum

Wie bereits in AP 2.1.3 beschrieben, dient zu Ermittlung einer optimalen Lösungstrajektorie die Dynamische Programmierung. Deren Ergebnis wurde hinsichtlich SOC-Verlauf und Motor-Start-Stopp Optimierung mit den Ergebnissen der prädiktiven ECMS (pECMS) verglichen. Exemplarisch ist der Vergleich für den NEFZ in Abbildung 44 dargestellt.

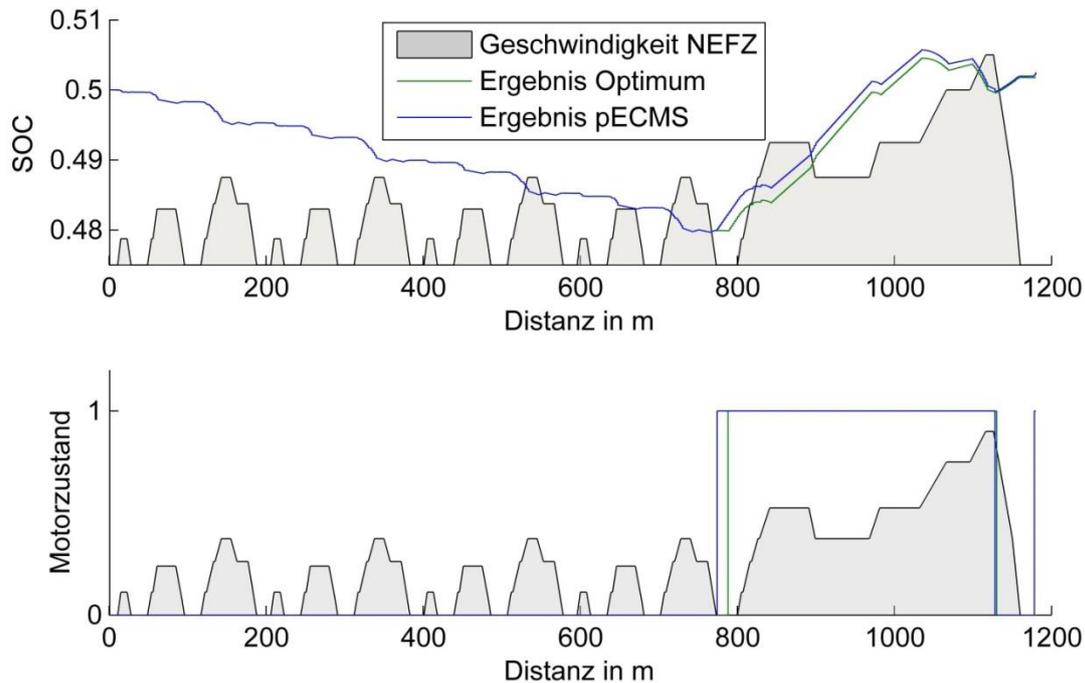


Abbildung 44: Vergleich DP und pECMS

Man erkennt leichte Abweichungen der ECMS, da diese Methodik die Ladungsabhängigkeit der Batterieeigenschaften vernachlässigt.

Vergleich mit Charge-Depleting

Bei dieser Strategie wird der Range Extender erst in Betrieb genommen, wenn der SOC der Batterie einen bestimmten Wert erreicht hat. Um eine möglichst hohe Energieeffizienz zu erreichen, wird der Range-Extender im Bestpunkt betrieben.

Bei der Überlegung zur Charge-Depleting-Strategie wird allerdings vernachlässigt, dass die Batterie einen leistungsabhängigen Wirkungsgrad besitzt. Je größer die Ströme an den Klemmen der Batterie sind, desto schlechter ist deren Wirkungsgrad. Zur Maximierung der Energieeffizienz ist es sinnvoll, den Range Extender hauptsächlich in Betriebspunkten zu betreiben, in denen ein Großteil der elektrischen Energie von den Antriebsmotoren umgesetzt wird. Abbildung 44 verdeutlicht die beschriebene Strategie, welche lediglich bei hoher Fahrleistung den Range-Extender zuschaltet.

Unter bestimmten Randbedingungen kann eine vollständige Entladung der Batterie bei dem Erreichen des Ziels sinnvoll sein. Beispielsweise wenn ausreichend Zeit zum Wiederaufladen der Batterie unter Nutzung kostengünstiger elektrischer Energie zur Verfügung steht. Abbildung 45 zeigt einen Vergleich zwischen der prädiktiven ECMS, welche die gesamte Fahrtstrecke in ihre Berechnung einbezieht, und einer simplen Charge-Depleting-Strategie mit kleinem Ladungsfenster.

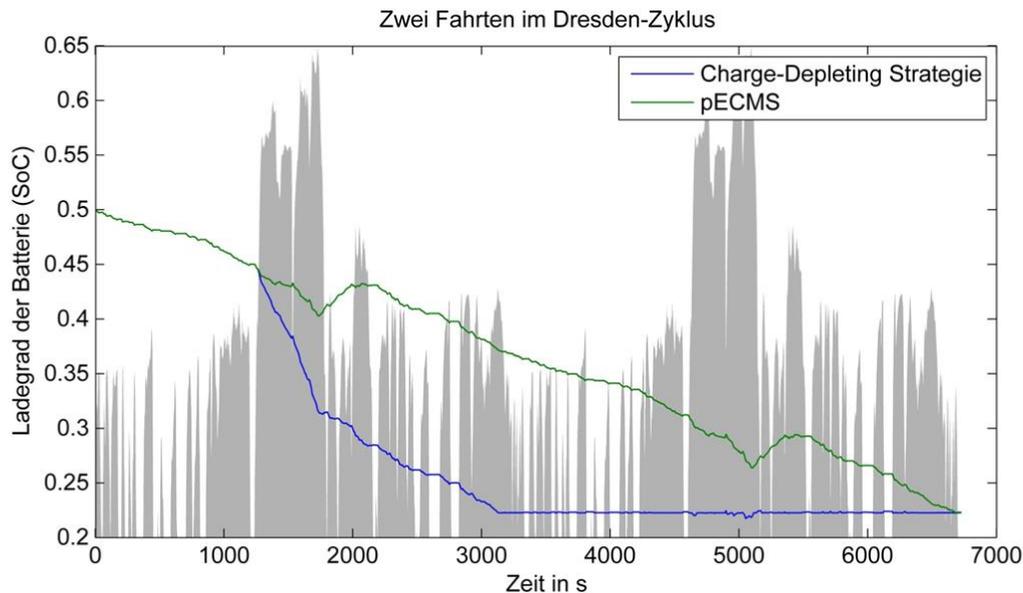


Abbildung 45: Vergleich Charge-Depleting-Strategie mit ECMS im Dresden-Zyklus

In Grau ist das Geschwindigkeitsprofil angedeutet. Es handelt sich um zwei Fahrten im Dresden-Zyklus. Durch die große Kapazität der Batterie des activeE zeigen sich erst bei großen Fahrstrecken die Auswirkungen der beschriebenen Strategien.

Im Vergleich zur Charge-Depleting Strategie kann durch die pECMS Strategie 25% Energie eingespart werden.

Erweiterung um Optimierung der Emissionen

Ein weiterer Schwerpunkt des Arbeitspakets war neben der Minimierung des Kraftstoffbedarfs, die Minimierung der Emissionen des Range-Extenders. Es handelt sich dabei um eine multikriterielle Minimierung, da neben dem Kraftstoff auch Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickoxide (NOx) und Kohlenwasserstoffverbindungen (THC) minimiert werden sollen. Damit wurde sich ausgiebig in der Arbeit von Herrn Prusas [Pru14] auseinandergesetzt. Der Ansatz sieht vor, dass nicht die äquivalente Leistung $P_{\text{äqui}}$ minimiert wird, sondern eine Größe

$$\text{Formel 15:} \quad \vec{K} = \vec{C}_{\text{ges}} + \lambda \cdot \vec{P}_{\text{inner,norm}}$$

$P_{\text{inner,norm}}$ ist die auf eins normierte Batterieleistung. Die Größe

$$\text{Formel 16:} \quad C_{\text{ges}} = k_{\text{Krst}} \cdot C_{\text{Krst}} + k_{\text{CO}} \cdot C_{\text{CO}} + k_{\text{NOx}} \cdot C_{\text{NOx}} + k_{\text{THC}} \cdot C_{\text{THC}}$$

ist über alle zu minimierenden Größen gewichtet und ebenfalls normiert.

Die einzelnen Werte C_x für $x = \{\text{Krst}; \text{CO}; \text{NOx}; \text{THC}\}$ sind die jeweils auf den Maximalwert normierten Kennfelder der einzelnen Größen. Diese liegen Untersuchungen aus AP 2.1.4 zugrunde.

Durch Parametervariation werden die Wichtungsfaktoren k_x ermittelt. Mit der Kombination $k_{\text{Krst}} = 0,6$, $k_{\text{CO}} = 0$, $k_{\text{NOx}} = 0,2$ und $k_{\text{THC}} = 0,2$ lässt sich bei einer Verbrauchssteigerung von

1 % eine Emissionsreduktion von 98 % für CO, 32 % NOx und 89 % HC gegenüber die reinen Kraftstoffoptimierung erzielen.

In dem vergangenen Kapiteln konnte nachgewiesen werden, dass die Anwendung der ECMS in Verbindung mit einer detaillierten Modellierung des Verbrennungsmotors zur Einsparung von Kraftstoff und zur Reduzierung der Abgasemissionen beitragen kann.

AP 3.1: Fahrstrategie

Im Rahmen des Arbeitspakets 3.1 werden Funktionen erarbeitet und spezifiziert, die den Fahrer bei einer vorausschauenden und effizienten Fahrweise unterstützen sollen. Neben konstruktiven Eigenschaften des Fahrzeugs beeinflusst die Fahrweise den Energieverbrauch des Fahrzeugs in hohem Maße. Die Fahrweise ist dabei geprägt von einem individuellen Beschleunigungs- und Bremsverhalten. Ein großes Effizienzsteigerungspotential besteht nun darin, den Wahrnehmungshorizont des Fahrers für eine aktuelle oder bevorstehende Fahrsituation durch geeignete Fahrzeugfunktionen derart zu erweitern, dass durch eine situationsangepasste Fahrempfehlung an den Fahrer eine ausgewogene und gleichmäßige Fahrweise erzielt werden kann, z.B. das Vermeiden des Stillstands vor Lichtsignalanlagen (LSA) durch eine Empfehlung zur Anpassung des Geschwindigkeitsniveaus auf der LSA-Zufahrt.

AP 3.1.1 Anforderungsdefinition und Rahmenbedingungen

Die notwendigen Schnittstellen für die Umsetzung der Fahrstrategien im Demonstrator wurden spezifiziert und in Zusammenarbeit mit BMW für den Versuchsträger definiert. Daten zur Prognoseerstellung sind durch die Arbeiten von AP 1.3 und AP 1.4 zur Verfügung gestellt worden. Für die Umsetzung der Fahrstrategie wird der in AP 1.3 erarbeitete Elektronische Horizont für die Kurzzeitprognose der Fahrsituation genutzt. Die Spezifikation lehnt sich an das ADAS-Protokoll an. Zudem dienen Daten, welche von AP 1.4 geliefert werden als wesentliche Eingangsgrößen für die Umsetzung der Fahrstrategie im innerstädtischen Bereich. Hier werden Entfernungen, Schaltzeiten und Prognosegüte von Lichtsignalanlagen und der aktuelle Rückstau vor der LSA an das Fahrzeug übertragen. Die Übertragung erfolgte im Rahmen des Projekts über UMTS.

AP 3.1.2/3 Spezifikation inner- & außerstädtischer Fahrzeugfunktionen

In diesen Arbeitspaketen wurden mögliche Fahrzeugfunktionen zur Unterstützung des Fahrers in energetisch besonders relevanten (sowie sicherheitskritischen) Fahrsituationen entworfen bzw. für die Annahme einer geänderten Antriebsstrangstruktur (z.B. rein elektrischer vs. konventioneller, verbrennungsmotorischer Antrieb) adaptiert. Grundlage zur Identifikation und Spezifikation von geeigneten Fahrerunterstützungsfunktionen bildet der erstellte Situationskatalog, der Fahrsituationen bzw. Fahrsituationsübergänge hinsichtlich energetischer Relevanz klassifiziert.

Bei der Analyse innerstädtischer Fahrsituationen konnte festgestellt werden, dass Verkehrssituationen bei denen Lichtsignalanlagen eine Rolle spielen deutlich mehr fokussiert werden müssen. Diese stellten daher einen Untersuchungsschwerpunkt im AP 1.4 dar und wurden somit stärker berücksichtigt. Besondere Berücksichtigung bilden dabei Geschwindigkeitsempfehlungen vor Kreuzungen mit LSA, die unscharfe Schaltzeiten und Rückstaulängen berücksichtigen sollen. Zudem werden mehrere Lichtsignalanlagen in Reihe betrachtet und die Abhängigkeiten der Schaltprogramme auf die Umsetzbarkeit einer Fahrstrategie untersucht. Der Fokus der Fahrerunterstützungsfunktion liegt bei Geschwindigkeitsempfehlungen im innerstädtischen Bereich zur Effizienzsteigerung.

AP 3.1.4 Simulation Energieverbrauch Einzelfahrzeug

Für die Einzelfahrzeugsimulation wird das im Rahmen von AP 2.1 erarbeitete Längsdynamikmodell genutzt. Dabei handelt sich um ein Modell des BMW ActiveE. Mit Hilfe des Modells ist es möglich, den Bedarf an elektrischer Energie für Kundenprofile zu ermitteln. Die Ermittlung des Energiebedarfs im NEFZ ist bereits in AP 2.1 erfolgt.

Das Fahrzeugmodell wurde zur Energiebedarfsermittlung in der Simulationsumgebung MATLAB/Simulink implementiert. In Zusammenarbeit mit AP 2.1 erfolgte die Analyse des Energiebedarfs des Einzelfahrzeuges für definierte Fahrzyklen. Die benötigten Fahrprofile wurden dazu teilweise durch die makroskopische Simulation (näheres dazu in AP 3.1.5) gewonnen. Hier werden Fahrtrajektorien eines spezifischen Fahrzeuges aufgezeichnet und zur Ermittlung des Energiebedarfs dieses Fahrzeuges im Post-Processing in Matlab ermittelt. Die Ergebnisse konnten auch für die Analyse typischer Fahrsituationen in AP 3.1.2 & 3.1.3 genutzt werden.

AP 3.1.5 Simulation des Fahrzeugs im Gesamtverkehr

Ein wesentlicher Schwerpunkt des Forschungsprojektes bestand in der Simulation des Fahrzeugs im Gesamtverkehr. Dazu war es geplant das kommerzielle Tools VISSIM der Firma PTV Group zu nutzen. Es stellte sich jedoch schnell heraus, dass es sinnvoll ist ein anderes Tool (SUMO [Kra12]) zu nutzen. Gründe dafür waren zum einen die gute Performance von SUMO und der geringe Implementierungsaufwand für einzelne Teilstrecken. Außerdem bietet die Verwendung von SUMO ein erhöhtes Verwertungspotential der Ergebnisse, da es sich um Open Source, also eine freie Software handelt, welche ständig weiterentwickelt wird, und welche im Hinblick auf die Verwendung in Lehre und Forschung eine sehr gute Position einnimmt.

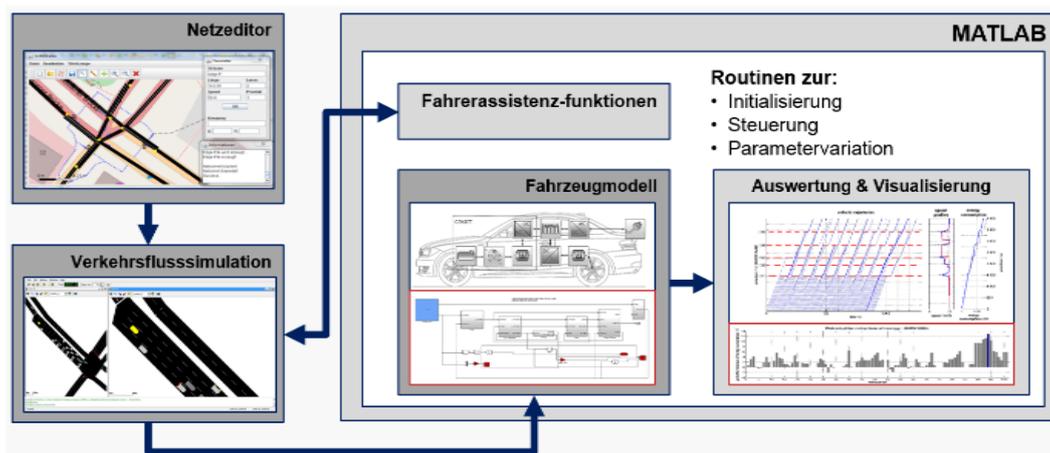


Abbildung 46: Systemübersicht der Schnittstelle MATLAB/SUMO zur gekoppelten Simulation.

Um quantitative und reproduzierbare Aussagen über den Energieverbrauch eines Fahrzeugs unter realistischen Bedingungen in Wechselwirkungen mit anderen Fahrzeugen treffen zu können wurde im Rahmen des Projektes die Verkehrsflusssimulationssoftware SUMO mit MATLAB/Simulink gekoppelt. Damit ist es möglich Fahrzeuge in SUMO während der Laufzeit zu manipulieren und den Einfluss von Fahrerunterstützungsfunktionen in MATLAB zu untersuchen. Die benötigte JAVA-Library [Kru13] wurde in MATLAB integriert. Genauere Angaben dazu finden sich in [Sch13] oder auch [Sch14]. Mit dieser Schnittstelle (siehe Abbildung 46) sind zahlreiche Untersuchungen denkbar. Es besteht z.B. die Möglichkeit verschiedene effizienzsteigernde Assistenzsysteme in einer Verkehrsumgebung zu analysieren und den Einfluss unterschiedlicher Störungen gezielt zu untersuchen.

Verkehrsflusssimulation mittels SUMO

Im Bereich der Verkehrsmikrosimulationen gibt es zahlreiche Softwareapplikationen, welche die bekannten Fahrzeugfolgemodelle wie z.B. Wiedemann, Krauß oder IDM (Intelligent Driver Model) implementieren. Beim Einsatz im akademischen Umfeld erscheint es zweckmäßig auf eine Open Source Anwendung zu setzen, da die Mikrosimulation nur als Plattform für weitere Betrachtungen dienen soll. Die Anforderung besteht also darin, die Wechselwirkung der einzelnen Verkehrsteilnehmer sicher abbilden zu können, wobei das Verhalten einzelner Fahrzeuge gezielt verändert werden kann. Die Software SUMO (Simulation of Urban Mobility) erfüllt die Anforderungen an die gewünschte Rechengeschwindigkeit und den benötigten Detaillierungsgrad. Für die Interaktion mit der Simulation verfügt SUMO über eine native Softwareschnittstelle mit dem Namen TraCI (Traffic Control Interface), welche die Möglichkeit zur bidirektionalen Kommunikation bereitstellt. Diese Kommunikation wird mithilfe von Datenpaketen (Byte Nachrichten) realisiert. Es besteht somit die Möglichkeit die Simulation zur Laufzeit direkt mit Daten der Sensorik/Aktorik zu versorgen, was zu einer sehr realitätsnahen Simulation führt. [Kra12], [Kru13b]

TraaS zur externen Steuerung von SUMO

Um die Kommunikation mit SUMO weiter zu verbessern, wurde eine Erweiterung [Kru13a] der existierenden Softwareschnittstelle entwickelt, welche alle verfügbaren Funktionen von TraCI auch als Webservice bereitstellt. Diese Erweiterung mit dem Namen TraaS (TraCI as a Service) wurde vollständig in Java geschrieben und unterliegt einer Open Source Lizenz. Neben dem Einsatz als Webservice kann diese Erweiterung auch als Software Bibliothek in Java verwendet werden, welche alle Funktionen der Kommunikation mit SUMO bereitstellt. Die beschriebene TraaS-Schnittstelle wurde in MATLAB integriert um die entsprechenden JAVA-Methoden zur Steuerung der Simulation und Abfrage von Simulationsdaten nutzen zu können [Sch13]. Dadurch ist eine bidirektionale Kommunikation zwischen beiden Tools mit entsprechendem Datenaustausch möglich. MATLAB dient hierbei als Client zur Steuerung der Verkehrsflusssimulation die in SUMO abläuft.

Automatisierte Gewinnung streckenbezogener Daten

Für die Berechnung einer effizienten Annäherungsstrategie eines Fahrzeugs an eine LSA sind fahrzeug- und streckenbezogene Daten relevant. Die Daten der Fahrzeuge sind bereits durch die verfügbaren TraaS-Methoden ermittelbar. Für jedes Fahrzeug in SUMO ist eine

Route durch das Netz definiert. Folgende streckenbezogenen Daten für diese Route müssen durch geeignete Methoden ermittelt und dem Fahrzeug zur Verfügung gestellt werden:

- erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf Streckenabschnitten
- aktuelle Position des Fahrzeugs auf gewählter Route
- LSA Informationen (Positionen, Rot-/Grünphasen, Rückstau,...)

Diese Informationen werden zum einen in der Vorverarbeitung aus Konfigurationsdateien und zum anderen direkt während der Simulation in SUMO ermittelt. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 47 dargestellt. In Anlehnung an das ADASIS Protokoll [Res05] werden diese dem TLAS in Form eines Elektronischen Horizonts zur Verfügung gestellt.

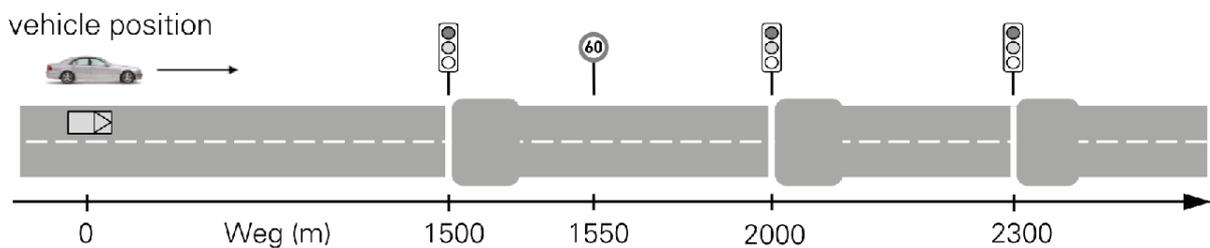


Abbildung 47: Elektronischer SUMO-Horizont

Implementierung eines LSA-Assistenzsystems

Das Assistenzsystem ermittelt mit Hilfe der LSA-Daten (Entfernung und Phaseninformationen) eine Annäherungsgeschwindigkeit an die nächste LSA, damit das Fahrzeug diese möglichst ohne Halt bei Grün passieren kann. Dafür wird der in [Asa10] beschriebene Ansatz genutzt. Als Eingangsgröße dienen die Zeitintervalle für die Grün-/Rotphasen t_{gi} bzw. t_{ri} und die Entfernungen d zur LSA.

$$t_{gi} = [t_{g1}, t_{g2}, \dots, t_{gn}]$$

Formel 17:

$$t_{ri} = [t_{r1}, t_{r2}, \dots, t_{rn}]$$

Es werden Geschwindigkeitsintervalle errechnet, welche mit der unteren und oberen Grenzgeschwindigkeit v_{min} und v_{max} für eine Fahrempfehlung verglichen werden. Liegen diese innerhalb des Intervalls, so wird die maximal mögliche Geschwindigkeit dem Fahrermodell in SUMO als Wunschgeschwindigkeit vorgegeben.

Formel 18:

$$[v_{min}, v_{max}] \cap \left[\frac{d}{t_{ri}}, \frac{d}{t_{gi}} \right]$$

Berücksichtigung der Rückstauinformationen

In der Mehrzahl der Verkehrssituationen die im Straßenverkehr auftreten können ist ein Rückstau an Ampeln vorhanden. Der Rückstau wird daher bei der Berechnung der Annäherungsgeschwindigkeit in Form einer effektiven Freigabezeit und einer virtuellen Haltelinie berücksichtigt [Sch10], [Sch11]. Abbildung 48 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Für die Geschwindigkeitsintervalle ergibt sich somit folgender Zusammenhang:

Formel 19:
$$[v_{min}, v_{max}] \cap \left[\frac{d}{t_{ri}}, \frac{d - d_q}{t_{gi} + t_{qi}} \right]$$

Die Grünphase verlängert sich um den Korrekturfaktor t_{qi} und der Punkt der freien Passierbarkeit verschiebt sich um die Länge des Rückstaus d_q . Die so ermittelte Annäherungsgeschwindigkeit wird an das zu manipulierende Fahrzeug in SUMO übertragen um den Einfluss des Assistenzsystems gezielt zu untersuchen.

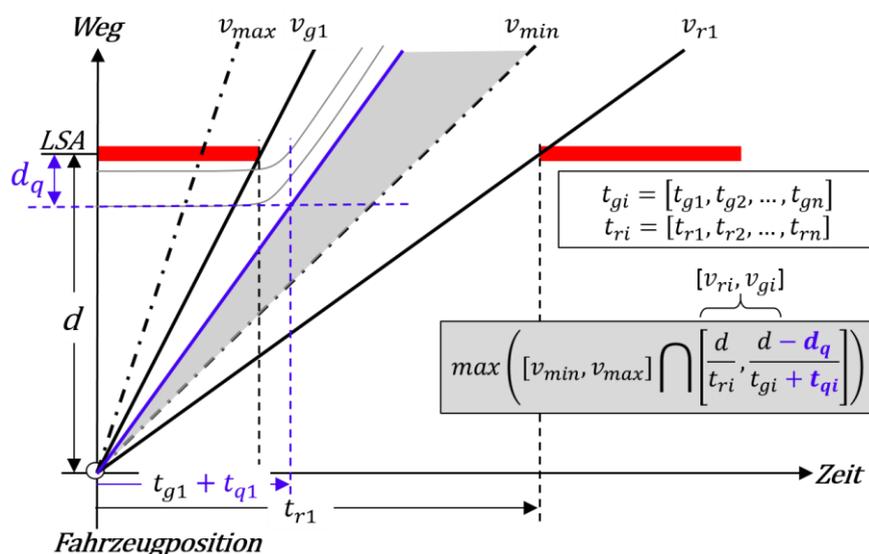


Abbildung 48: Schematische Darstellung der Assistenzfunktion mit Punkt der Freien Passierbarkeit und Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung des Rückstaus

Berücksichtigung mehrerer LSA in Reihe

Wird für die Strategieempfehlung nur die nächste LSA einbezogen, so erschließt sich bereits hohes Potential. Durch die Beschränkung der Fahrempfehlung auf eine akzeptable Mindestgeschwindigkeit, kann es vorkommen, dass der Stillstand an einer LSA nicht verhindert werden kann. In bestimmten Verkehrsszenarien kann es dadurch von Vorteil sein, auch die darauf folgende LSA zu berücksichtigen. Wie in Abbildung 49 dargestellt kann der Stillstand nur verhindert werden, wenn die Geschwindigkeit bereits an der vorhergehenden LSA verringert wird. In Abbildung 49 sind die Fahrtrejektorien für ein ausgewähltes Fahrzeug mit zwei verschiedenen Ausprägungen des FAS dargestellt.

Fall 1: FAS X1: Geschwindigkeitsempfehlung erfolgt lediglich für die nächste LSA

Fall 2: FAS X2: Geschwindigkeitsempfehlung erfolgt für nächste und übernächste LSA

Für das gezeigte Beispiel in der Ausprägung FAS X1 kann der Stillstand an der LSA „n05“ nicht verhindert werden. Wird die Geschwindigkeit wie bei FAS X2 bereits bei Annäherung an die vorhergehende LSA „n04“ verringert wird, erweitert sich dadurch der zeitliche Entscheidungshorizont für die Erreichung der LSA „n05“. Der Stillstand ist somit innerhalb der zulässigen Geschwindigkeitsgrenzen vermeidbar.

Parametervariation und Ergebnisse

Um das vorgestellte Assistenzsystem genauer zu untersuchen wird auf der vorgestellten Beispielstrecke (Abbildung 50) eine Parametervariation durchgeführt. Um Aussagen bezüglich des Potentials der Assistenzfunktion zu treffen wurde das Untersuchungsfahrzeug in folgenden drei Varianten simuliert:

Variante 1: ohne Assistenz

Variante 2: mit Assistenzsystem FAS X1 (1 LSA)

Variante 3: mit Assistenzsystem FAS X2 (2 LSA)

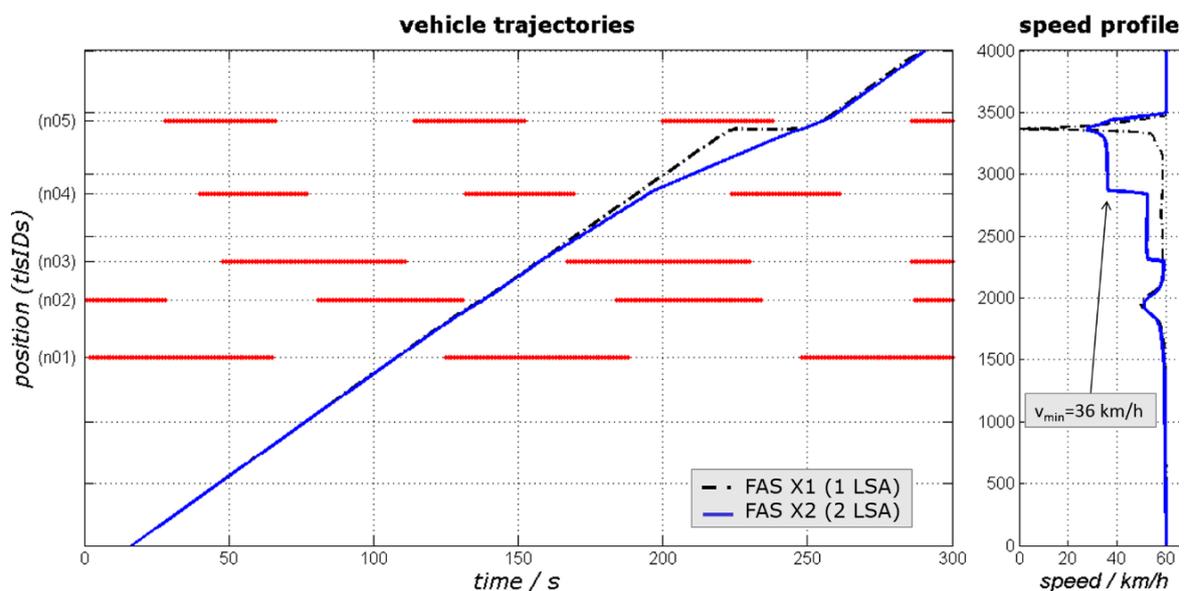


Abbildung 49: Verdeutlichung des Einflusses der Ausprägung des FAS bei Beschränkung der minimal akzeptierten Geschwindigkeit ($v_{min} = 36 \text{ km/h}$), welche dem Fahrer empfohlen wird. Werden zwei aufeinanderfolgende LSA für die Geschwindigkeitsempfehlung berücksichtigt ($X = 2$) so kann ein zusätzlicher Stopp verhindert werden.

Folgende Parameter wurden variiert:

Eintrittszeitpunkte t_e im Bereich $t_e = 5 \text{ s} \dots 500 \text{ s}$ mit einer Schrittweite von $\Delta t_e = 5 \text{ s}$

Verkehrsstärke q im Bereich $q = 0 \dots 500 \text{ Fzg/h}$

Zur Ermittlung von Kraftstoff-/Energieverbräuchen einzelner Verkehrsteilnehmer und zur Ermittlung des Verbesserungspotentials durch die Verwendung von Fahrerunterstützungsfunktionen wurde das Modell aus AP 3.1.4 in MATLAB integriert und mit den Simulationsergebnissen aus SUMO gekoppelt.

Anhand der Simulation von Beispielszenarien konnte das Potential der Ampelassistentz nachgewiesen werden. Untersuchungen mittels dieses Frameworks haben das Potential verdeutlicht. Jedoch wurden auch Unzulänglichkeiten ersichtlich. So wurde beispielsweise bekannt, dass ein Assistenzsystem, welches nur die unmittelbar nächste LSA in die Berechnung einbezieht, an dieser sehr gute Einspareffekte erzielbar sind. Jedoch kommt es dadurch häufig zu ungünstigen Konstellationen im weiteren Streckenverlauf.

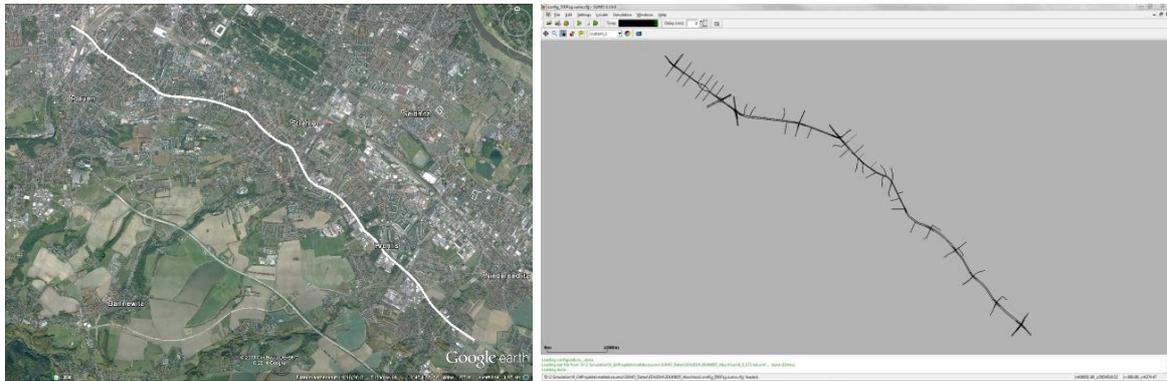


Abbildung 50: *Links:* Luftbild der Pilotstreck [Kartendaten ©2009 GeoBasis-DE/BKG, ©2014 Google]. *Rechts:* Modell der Pilotstrecke in SUMO

Im weiteren Projektverlauf konnte die Pilotstrecke im Dresdner Stadtgebiet nachgebildet werden (siehe Abbildung 50). Es wurden insgesamt 8km der Pilotstrecke mit 15 LSA nachgebildet. Die verwendeten LSA-Schaltdaten wurden aus der Verkehrsleitzentrale importiert. Mit Hilfe des Modells wurden verschiedene Parametervariationen berechnet. Einige Ergebnisse sind in Abbildung 51 und Abbildung 52 dargestellt.

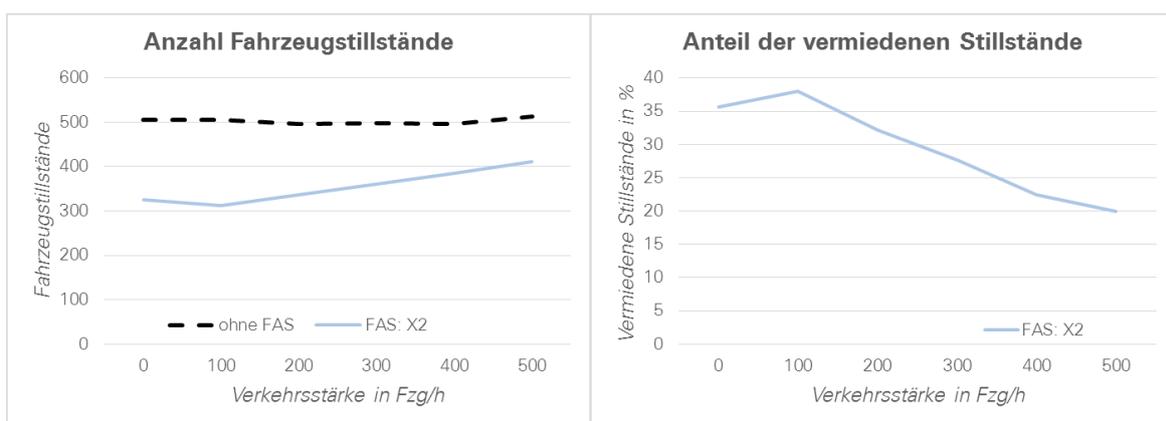


Abbildung 51: Ergebnis der Parametervariation auf virtueller Pilotstrecke. Anzahl der Fahrzeugstillstände. Rechts: Anteil der vermiedenen Stillstände in Abhängigkeit der Verkehrsstärke

Eine deutliche Reduzierung von Fahrzeugstillständen zeigt Abbildung 51 für die simulierten Szenarien. Die Durchschnittliche Reduzierung liegt bei bis zu 38% (bei einer Verkehrsstärke von 400Fzg/h). Mit zunehmender Verkehrsstärke verringert sich der Anteil der vermiedenen Stillstände deutlich.

Abschließend ist in diesem AP noch eine Erweiterung der Assistenzfunktion um die Berücksichtigung mehrerer LSA in Reihe geplant. Zudem sollen noch verschiedene Ausstattungs-raten der Fahrzeuge untersucht werden. Weiterhin müssen Aussagen über die Auswirkungen der Assistenzfunktion auf andere Verkehrsteilnehmer getroffen werden. Dazu sind jedoch noch Erweiterungen an der Simulationsumgebung erforderlich, welche derzeit noch bearbeitet werden.

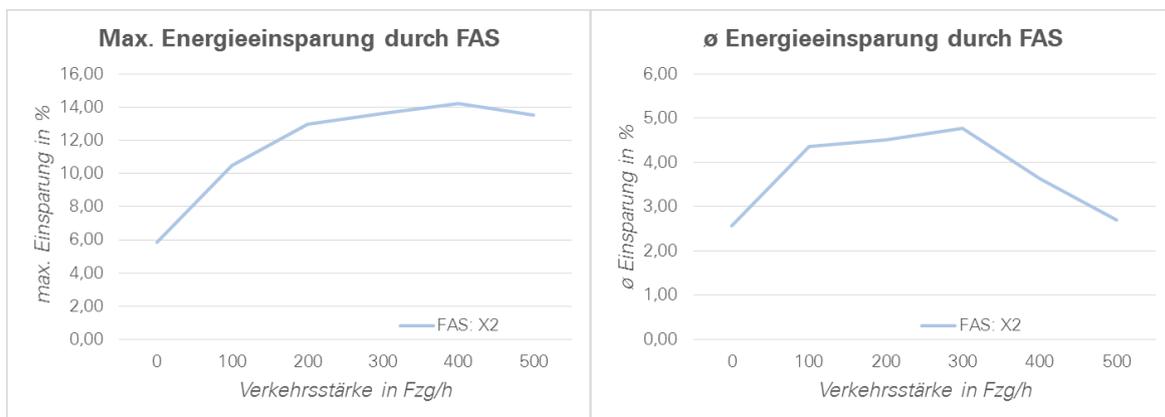


Abbildung 52: Ergebnis der Parametervariation auf virtueller Pilotstrecke. *Links:* Anzahl der Fahrzeugstillstände. *Rechts:* Anteil der vermiedene Stillstände in Abhängigkeit der Verkehrsstärke

Wie zu erkennen ist, zeigt das Assistenzsystem deutliches Einsparpotential. Die Energieeinsparung bezogen auf den durchschnittlichen Streckenenergieverbrauch liegt bei bis zu 14.23% für bestimmte Fahrsituationen (vgl. Abbildung 52 Verkehrsstärke=400Fzg/h). Das Maximum des durchschnittlichen Potentials liegt in den gezeigten Szenarien bei 4,78%. Es konnte jedoch auch ein Mehrverbrauch durch ungünstige Folgesituationen insbesondere bei hohen Verkehrsstärken nachgewiesen werden. Dies liegt darin begründet, dass Fahrzeuge durch eine Stillstandsvermeidung durch Überholvorgänge anderer Fahrzeuge teilweise die Haltelinie erst deutlich später passieren können. Dadurch kann in Einzelfällen eine ungünstige Folgesituation, also ein unvermeidbarer Stillstand resultieren.

AP 3.1.6 Vorbereitung der Funktionsimplementierung im Versuchsträger

Das Versuchsfahrzeug BMW ActiveE wurde der TU Dresden Mitte 2013 von BMW zur Verfügung gestellt. Um dem Fahrer im Bereich der Lichtsignalanlagen auf der ausgewählten Teststrecke in Dresden geben zu können, sind einige Vorarbeiten notwendig. Dies betrifft zum einen die Möglichkeit der Datenbereitstellung von LSA Daten im Fahrzeug und zum anderen die Positionsbestimmung und Abfrage der Fahrzeuginternen Sensorik. Für die Funktionsimplementierung wurde die verbaute dSPACE Autobox verwendet. Diese besitzt Schnittstellen zum Fahrzeugbussystem (PT-CAN, K-CAN, A-CAN und KAFAS-CAN) siehe

Abbildung 53. Es können somit die fahrzeugeigenen Daten, wie bspw. Fahrzeuggeschwindigkeit und -position abgefragt werden. Des Weiteren kann mit Hilfe der Autobox auch das verbaute Active-Force-Feedback-Pedal (AFFP) angesteuert werden. Die Autobox ermöglicht dabei eine online Parametrierung und Erprobung von entwickelten Steuerungs- und Regelalgorithmen. Im Zuge dessen wurden entsprechende Lizenzen beschafft um auf die vielfältige Funktionalität der Autobox in Verbindung mit MPRE und MATLAB/Simulink zugreifen zu können. Für die mobile Kommunikation mit der Verkehrsleitzentrale per UMTS wurde ein entsprechender UMTS Stick der Firma Huawei, ein kompatibler Router der Firma Netgear und ein entsprechender Datenvertrag (SIM-Karte) beschafft

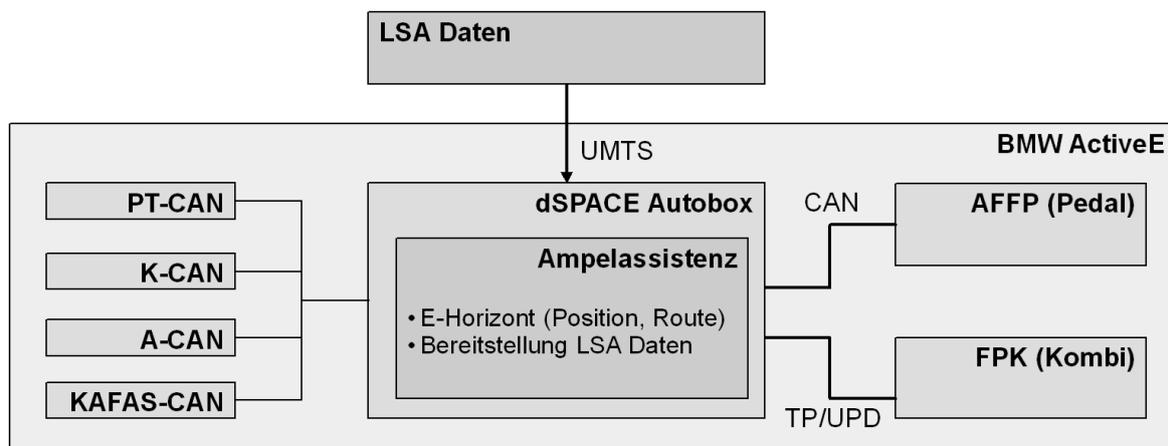


Abbildung 53: Systemübersicht der Assistenzfunktion im Versuchsträger. Bestehend aus Schnittstelle zu den Fahrzeugbussystemen, dSPACE Autobox und MMI (Anzeige und AFFP).

Zur Datenaufzeichnung der Versuchsfahrten werden 3 CAN Kanäle benötigt. Im Fahrzeug ist ein Datenlogger des Typs BluePiraT der Firma Telemotiv AG mit nur 2 CAN-Schnittstellen verbaut. Daher wurde ein anderer Datenlogger vom Typ GL2000 der Firma Vector Informatik beschafft und zur Datenaufzeichnung genutzt. Dieser bietet die Möglichkeit neben den fahrzeugspezifischen CANs auch den AFFP-CAN für die Ansteuerung des Activen-Force-Feedback-Pedals (AFFP) zu loggen. Gleichzeitig ist das Pedal an die Autobox angeschlossen und wird mittels ControlDesk während der Fahrt parametriert und betrieben.

AP 3.1.7 Probandenversuche zu Test & Erprobung effizienter Fahrstrategien

In enger Zusammenarbeit mit AP 3.3 wurden zur Erprobung der Funktionalität des AFFP Probandenversuche auf einer Teststrecke im Dresdner Umland durchgeführt (Abbildung 54). Dabei handelt es sich um eine 15.6 km lange Strecke mit zahlreichen Geschwindigkeitsbeschränkungen. Es wurden verschiedene Betriebsmodi des AFFP erprobt um die Vorteile des AFFP gezielt zu untersuchen. Zudem lag der Fokus der Untersuchung auf der Akzeptanz durch die Probanden. Es lässt sich sagen, dass ein Großteil der Probanden mit der Vorgabe des AFFP zufrieden war.

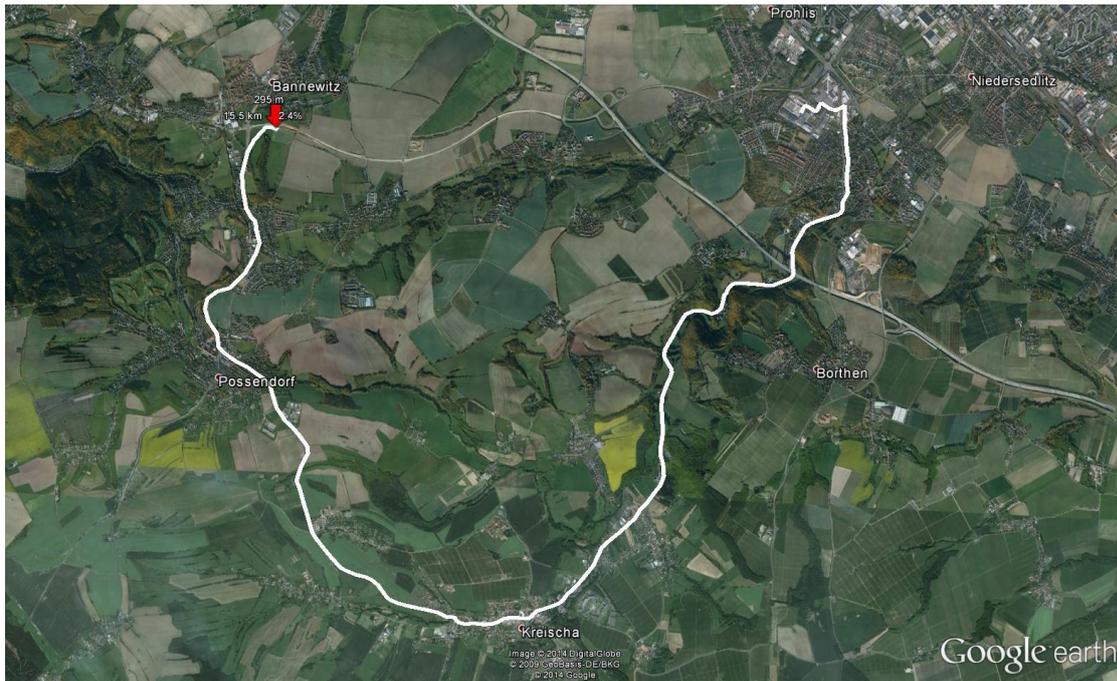


Abbildung 54: Teststrecke im Umland von Dresden zur Erprobung des AFFP (15.6 km)
[Kartendaten ©2009 GeoBasis-DE/BKG, ©2014 Google].

AP 3.3: Mensch-Maschine-Interface

Im Arbeitspaket 3.3 wurden Untersuchungen bezüglich der Gestaltung des Mensch-Maschine-Interface (MMI) zur Kommunikation effizienzsteigernder Funktionen im Fahrzeug durchgeführt. Dazu wurde eine Möglichkeit geschaffen, relevanten Informationen, welche anhand von Algorithmen in anderen Arbeitspaketen generiert wurden, in einen Demonstrator zu übertragen. Innerhalb des Fahrzeugs wurden die Informationen bedarfsgerecht aufbereitet und an den Fahrer kommuniziert [Kno09]. Schwerpunkt der Untersuchung war die Kommunikation von Hinweisen und Handlungsempfehlungen an Lichtsignalanlagen gesteuerten Knotenpunkten. Diese erweisen sich als besonders effizienzsteigernd, da durch die Vermeidung von Fahrzeugstillständen an Lichtsignalanlagen (LSA) ein hohes Potenzial an Energieeinsparung möglich ist, ohne die gesamte Reisezeit zu verlängern.

Die Menge an Energie, welche durch die Optimierung der längsdynamischen Verhaltensweise eingespart werden kann, ist maßgeblich vom Zeitfenster bzw. der Strecke abhängig, welche zwischen Beginn der Fahrerbeeinflussung und Passieren des Knotenpunktes zu Verfügung steht.

Da es sich bei den Informationen über die vorausliegenden LSA um anhand von Prognosen erstellte Daten handelt, sind diese mit gewissen Unschärfefaktoren behaftet.

Ziel des Arbeitspaketes war die Untersuchung des Beeinflussungszeitraumes bzw. Zeitpunktes und der Beeinflussungsart des Fahrers, sodass dieser die Daten trotz Unschärfe intuitiv interpretieren und umsetzen kann.

AP 3.3.1 Anforderungsdefinition MMI

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die durch das MMI an den Fahrer zu kommunizierenden Funktionen für das geplante Demonstratorfahrzeug zwischen den Projektpartnern BMW, FKFS und der TU Dresden abgestimmt. Definiert wurden die Funktionen, welche mit dem für den Standort Dresden bestimmten Demonstrator umgesetzt werden sollen. Hierbei wurde eine Unterteilung zum einen in Fahrsituationen und zum anderen in die Ebene der Informationsverarbeitung im Fahrzeug vorgenommen. Die Ebene mit dem tiefsten Eingriff stellt die Funktion des teilautonomen Fahrens dar. Hierbei werden die Informationen aus der Infrastruktur dazu verwendet, autonom in die Längsführung des Fahrzeugs einzugreifen. Die zweite Ebene bildet die vorrausschauende Rekuperation, wobei die Informationen aus der Infrastruktur dazu dienen, die Betriebsstrategie des Fahrzeugs zu beeinflussen. Die dritte Ebene bildet der Effizienzassistent, welcher dem Fahrer Informationen bzw. Handlungsempfehlungen gibt, um das Fahrzeug energieeffizient zu fahren. Auf den beiden ersten Ebenen ist ein Eingriff des Fahrers nicht zwingend erforderlich. Dennoch sind hier Hinweise an den Fahrer notwendig, um das Verständnis und damit die Akzeptanz des Systems zu gewährleisten. In der dritten Ebene findet der Eingriff in die Fahrzeugführung vollständig über den Fahrer statt. Als besondere Herausforderung ergeben sich hierbei zwei Schwerpunkte, welche im Projektfortgang zu bearbeiten sind:

1. Eine stimmige Gestaltung des Gesamtanzeige-konzepts.

2. Die Bewertung bzw. Berücksichtigung der unterschiedlichen Informationsgüte.

So wird bei der Verwendung von LSA-Informationen bezüglich Umschaltzeitpunkt und Rückstaulänge die Güte der prognostizierten Daten berücksichtigt. Für die Ebene der Effizienzassistenz besteht die Anforderung, auch Informationen, die mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind, so darzustellen, dass der Fahrer diese versteht und einordnet.

AP 3.3.2 Konzepterstellung und Spezifikation MMI allgemein

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Erarbeitung eines Konzepts zur Kommunikation von Fahrhinweisen an den Fahrer zur Steigerung der Effizienz bei der Fahrzeugführung. Die Übermittlung der Informationen ist hierbei fahrsituationsabhängig zu gestalten. Dabei sind Fahrerparameter zu identifizieren, welche entsprechend der Fahrsituation einen relevanten Einfluss auf die Effizienz der Fahrweise haben. Zur Identifizierung wurde eine Simulationsumgebung genutzt, mit welcher der Einfluss der Parameter untersucht werden kann. Die Simulationsumgebung wurde modular in die Elemente Fahrer, Fahrzeug und Umwelt unterteilt. Als Fahrzeug können beliebige Antriebsstrangkonfigurationen implementiert werden. Die Umwelt kann sowohl mit synthetischen, als auch mit realen Streckenverläufen parametrisiert werden. Dabei können neben Lichtsignalanlagen auch weitere Fahrzeuge zur Simulation des Umgebungsverkehrs abgebildet werden. Hiermit wurde die Voraussetzung geschaffen, den Fahrer als wesentliches Element für dieses Arbeitspaket in der Simulation zu untersuchen. Dabei kann der Fahrer über spezifische Parameter, wie Beschleunigungsverhalten, Verzögerungsverhalten und Reaktionszeit, beschrieben werden. Zudem bietet die Simulationsumgebung die Möglichkeit, die Reaktion des Fahrers auf Lichtsignalanlagen abzubilden.



Abbildung 55: Simulationsumgebung zur Abbildung von Fahrer, Fahrzeug und Umwelt

Neben der Simulation wurden reale Messfahrten sowohl auf der im Projekt definierten Verifikationsstrecke, als auch auf weiteren Routen im Stadtgebiet von Dresden durchgeführt. Hierbei wurden neben Fahrzeugzustandsgrößen wie Fahrgeschwindigkeit, Fahrzeugposition und Energiebedarf auch fahrerspezifische Eingabegrößen wie Lenkwinkel, Gas- und Bremspedalstellung aufgezeichnet. Diese Daten bildeten die Grundlage für den Abgleich bzw. die Parametrierung des Fahrermodells in der Simulation.

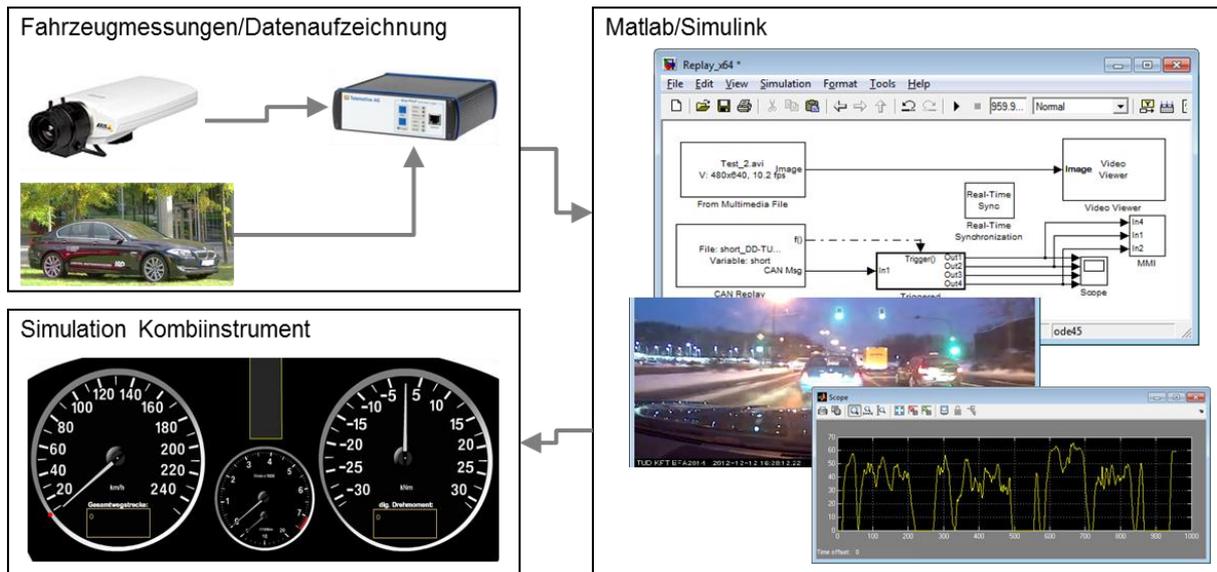


Abbildung 56: Abgleich zwischen Simulationsmodell und Messfahrten

Damit wurden die Voraussetzungen zur Konzeptentwicklung geschaffen. Die Detaillierung des Konzepts erfolgte anhand der Anforderungen und der technischen Möglichkeiten des Demonstrators.

Das entstandene Konzept basiert dabei im Wesentlichen auf der Informationsgüte und dem Potential zur Steigerung der Effizienz in der jeweiligen Situation.

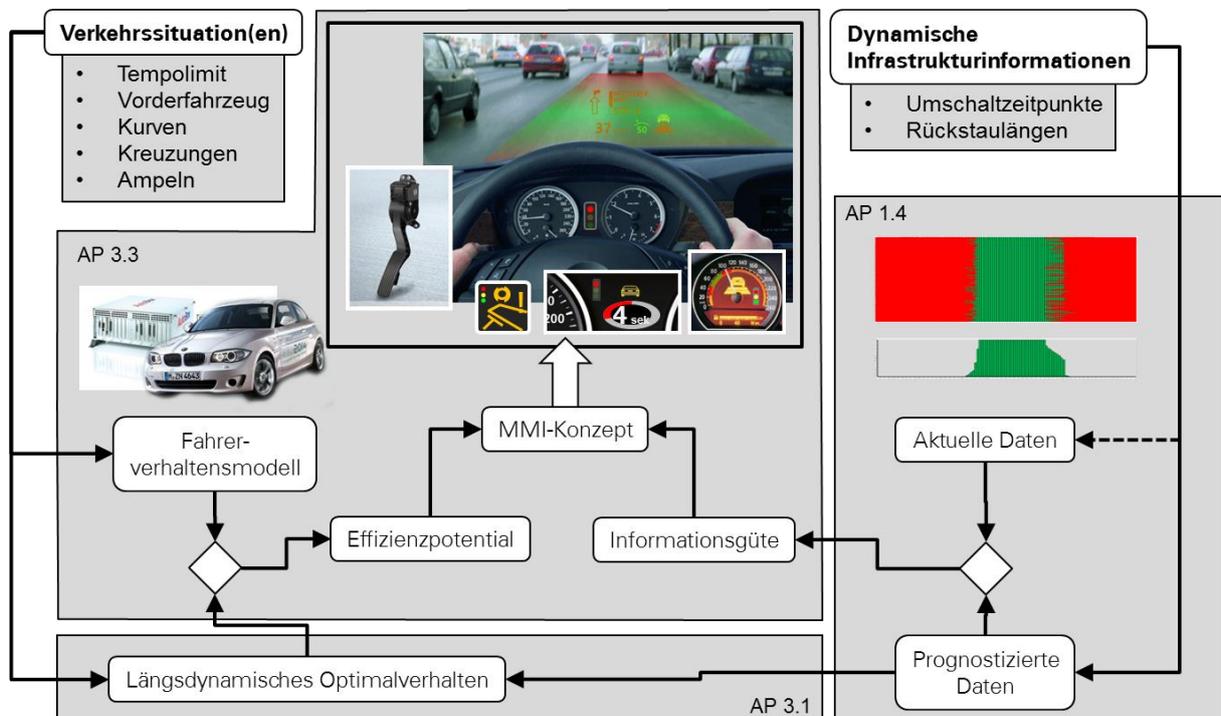


Abbildung 57: Funktionsschema des MMI-Konzepts

Zu erkennen ist, dass anhand der jeweiligen Situation zwischen dem tatsächlichen Fahrverhalten des Fahrers und dem energetisch optimalen Fahrverhalten verglichen wird. Daraus wird kontinuierlich abgeleitet, wie groß das Potential zur Effizienzsteigerung ist. Auf der anderen Seite wird die Güte der Infrastrukturinformationen bewertet. Anhand dieser Größen wird abgeleitet, in welcher Form die Informationen an den Fahrer weitergeleitet werden. Das entwickelte Konzept ermöglicht, so zu jedem Zeitpunkt, die richtigen Informationen in geeigneter Weise an den Fahrer zu kommunizieren.

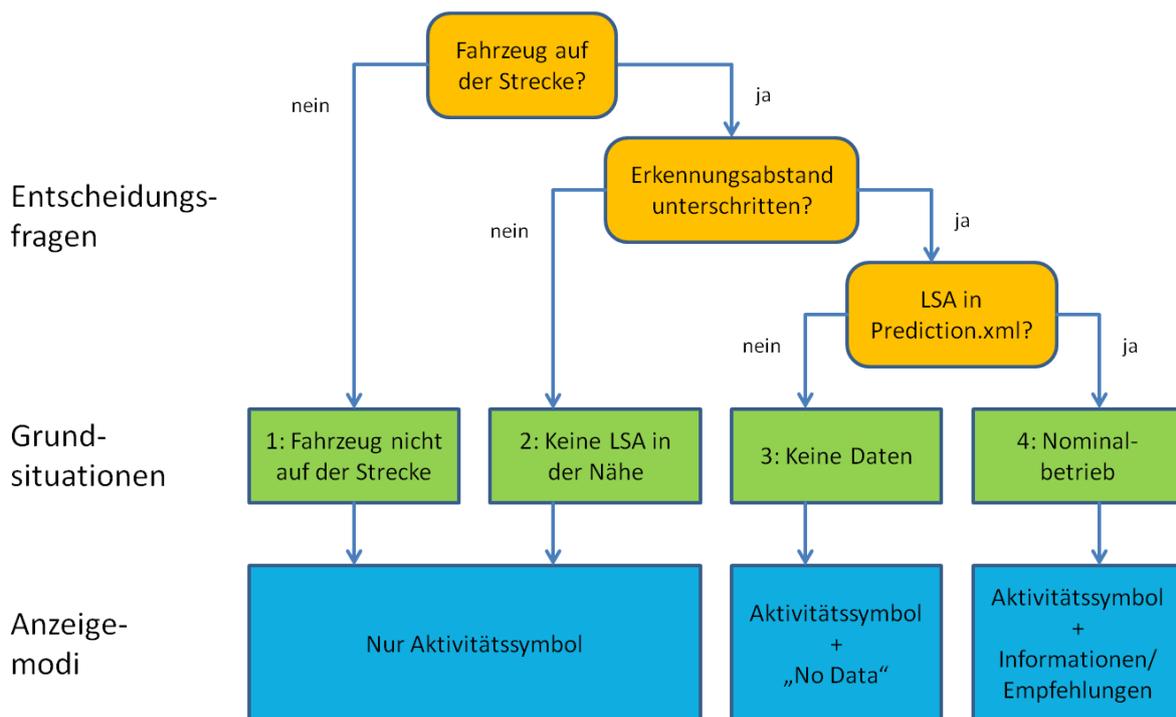


Abbildung 58: Schematische Darstellung der Entscheidungsfindung im MMI Konzept

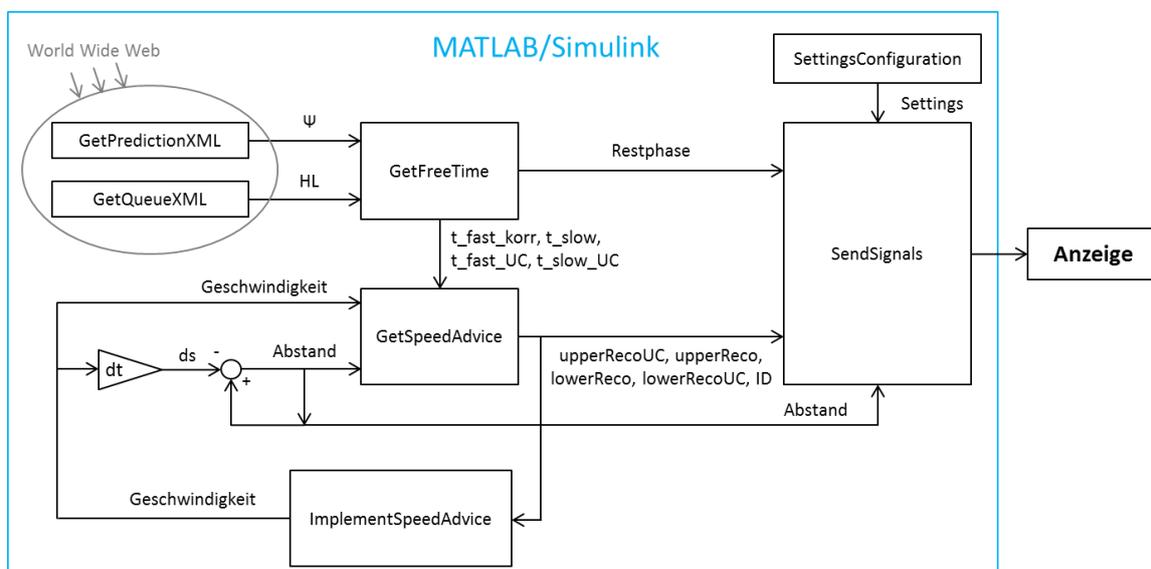


Abbildung 59: Struktur der Funktionslogik zur Anzeigeansteuerung in der Simulation

Die entwickelte Funktionslogik wurde in MATLAB/Simulink umgesetzt. Dabei wurde die Struktur so gewählt, dass diese sowohl in der Simulation als auch im Demonstrator zur Anwendung kommen konnte. Im Block „ImplementSpeedAdvice“ wurde das Simulierte Fahrerverhalten abgebildet.

AP 3.3.3 Realisierung/Umsetzungsvorbereitung für Demonstratoranzeige

Zur Adressierung des haptischen Kanals wurde das Serienfahrpedal durch ein aktives Fahrpedal ersetzt. Damit besteht die Möglichkeit, dem Fahrer über das Fahrpedal Hinweise zur energieeffizienten Fahrweise zu vermitteln. Diese Art der Weitergabe von Hinweisen an den Fahrer wird im Menschen auf einer anderen Bewusstseisebene und damit deutlich schneller verarbeitet, als optische Informationen.

Zur Kommunikation von Informationen an den Fahrer über den optischen Sinneskanal können in dem Demonstrator das Zentraldisplay und das Kombiinstrument verwendet werden. Über ein HeadUp-Display verfügt der Demonstrator nicht. Wobei hier Untersuchungen durchgeführt werden, dieses anhand von Augmented Reality zu simulieren. Das Kombiinstrument wurde durch ein frei ansteuerbares Pixeldisplay ersetzt. Damit besteht die Möglichkeit, neue Anzeigeelemente in prototypischer Form flexibel in das Anzeigekonzept zu integrieren und deren Wirksamkeit zu untersuchen.

Softwareseitig kam eine Kombination aus Matlab/Simulink, Flash und Actionscript zur Anwendung. Damit ist es möglich dem Fahrer eine intuitiv erlebbare Darstellung der Informationen zu präsentieren. Im Kombidisplay wurden im Wesentlichen zwei Bereiche identifiziert, welche vom Fahrer als besonders eingängig empfunden wurden.

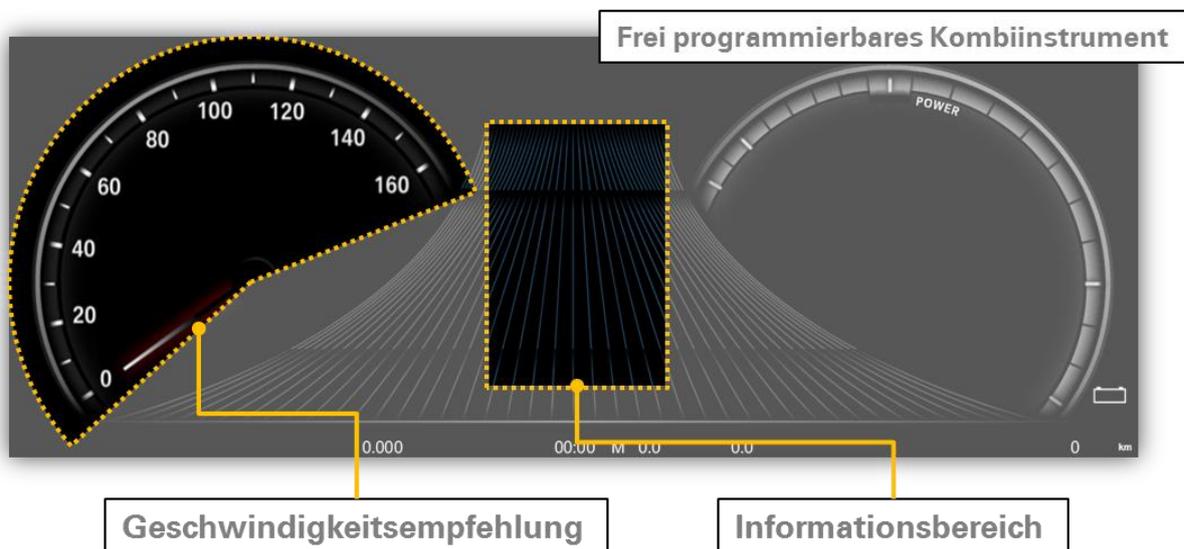


Abbildung 60: Darstellungsbereiche im Kombiinstrument

Während der Bereich der Geschwindigkeitsempfehlung dazu verwendet wurde, dem Fahrer die optimale Geschwindigkeit anzuzeigen, wurden im Informationsbereich weiterführende Informationen dargestellt.

Zu erkennen ist, dass eine Diskretisierung der empfohlenen Geschwindigkeitsbereiche durchgeführt wurde. Dabei stellen hellgrün dargestellte Bereiche Empfehlungen dar, welche aufgrund der vorliegenden Infrastrukturinformationen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zu einer effizienten Fahrweise führen. Die angrenzenden schwach grün dargestellten Bereiche repräsentieren Geschwindigkeiten, welche ebenfalls als effizienzsteigernd einzustufen sind, aufgrund der Unschärfe der Infrastrukturinformationen jedoch nicht zwingend erfolgreich umzusetzen sind.



Abbildung 61: Zwei Varianten der Darstellung effizienter Geschwindigkeitsbereiche

Im Informationsbereich wird dem Fahrer je nach Konstellation aus Empfohlener und gefahrenen Geschwindigkeit angezeigt, in welcher Art er sein längsdynamisches Verhalten anpassen sollte, bzw. wie die aktuelle Phasenlage der vorausliegenden LSA ist.

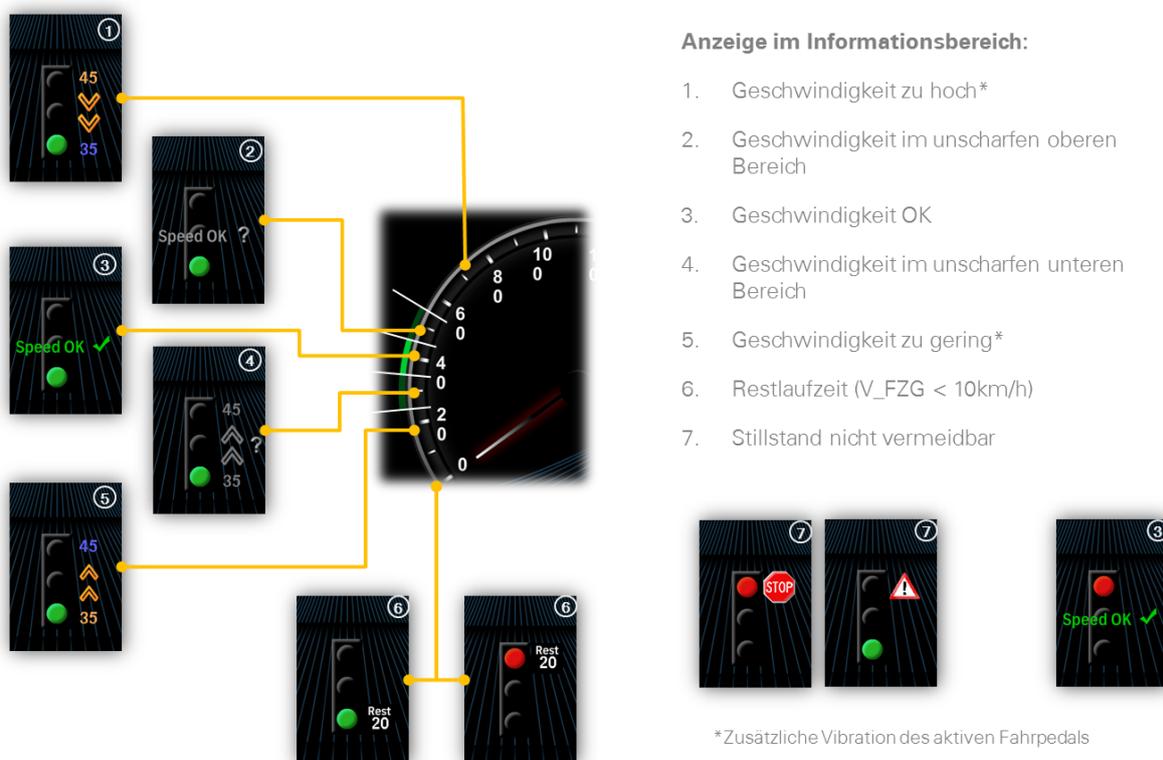


Abbildung 62: Zuordnung von Information und Geschwindigkeitsempfehlung

Während des Projekts wurden verschiedene Anzeigevarianten im Demonstrator implementiert und jeweils mit entsprechenden Variablen zur Aktivierung versehen. Eine Variante der Umsetzung ist in Abbildung 63 zu sehen.



Abbildung 63: Darstellung einer im Projekt EFA 2014/2 umgesetzten Anzeigenvariante zur Empfehlung von effizienten Geschwindigkeitsbereichen an LSA-gesteuerten Knotenpunkten

AP 3.3.4 Verifikation der Fahrweise mit aktivem Gaspedal

Im dem verwendeten Demonstrator wurde zur Projektlaufzeit ein aktives Fahrpedal (active force feedback pedal – affp) integriert. Das bedeutet, dass das Serienpedal durch ein Pedal ersetzt wurde, über welches aktiv das Rückstellmoment variiert werden kann. Damit können dem Fahrer auf dem haptischen Kanal Rückmeldungen über die effiziente Fahrweise zu kommuniziert werden. Die Umbauten erfolgten in Zusammenarbeit mit der Firma BMW und die Verifikation unter der Leitung vom FZI.

AP 3.3.5 Konzeptentwicklung AR-unterstützter Effizienzassistent

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurden neben konventionellen Anzeigeformen konzepte verfolgt, welche auf der Basis von Augmented Reality dem Fahrer Hinweise zur effizienten Fahrweise kommunizieren. Die Inhalte wurden in Zusammenarbeit mit weiteren Projektpartnern und unter Leitung der Firma metaio bearbeitet.

AP 3.3.6 Realisierung AR-unterstützter Effizienzassistent

Die Umsetzungsvorbereitung des AR-unterstützten Effizienzassistenten erfolgte unter Zuhilfenahme einer Entwicklungsumgebung und Leitung der Firma metaio in Zusammenarbeit mit der Firma BMW.

AP 3.3.7 Probandenversuche und Validierung

Zur Validierung des Systems wurden umfangreiche Testfahrten auf der Referenzstrecke in Dresden durchgeführt. Bei diesen Testfahrten wurden die jeweiligen Fahrzustände und Infrastrukturinformationen aufgezeichnet.

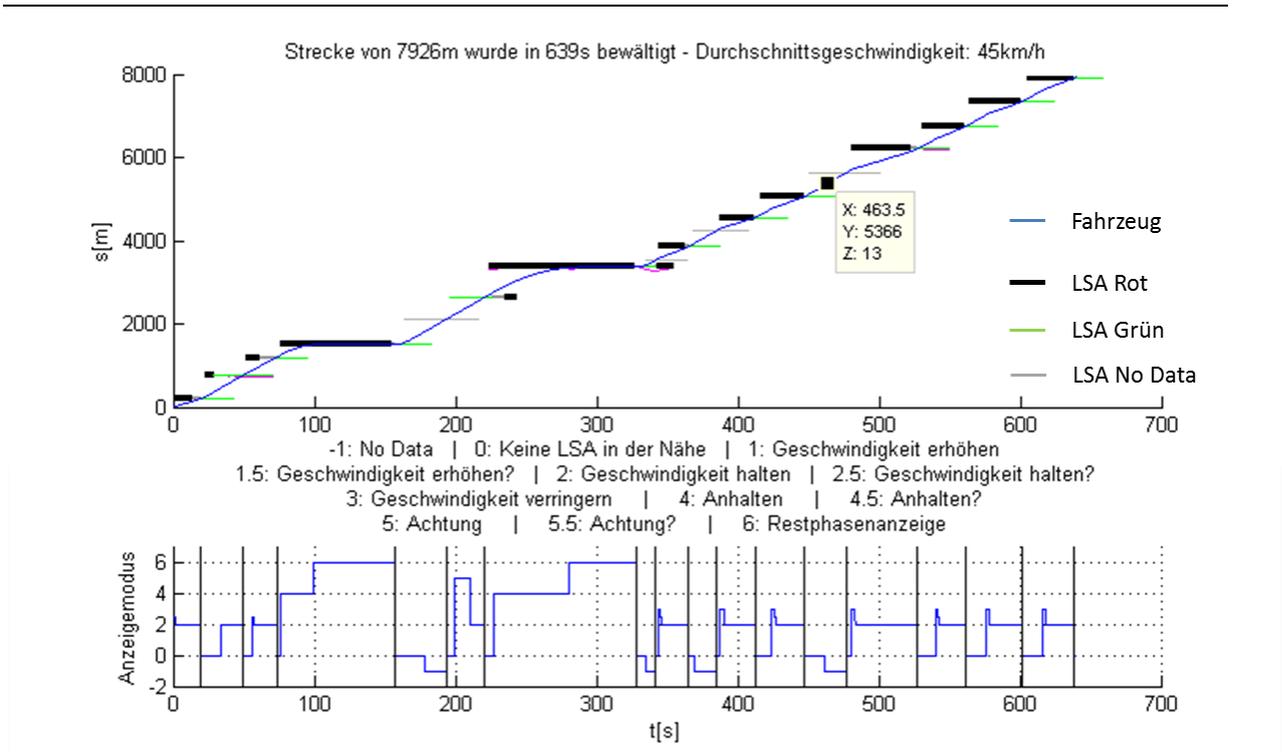


Abbildung 64: Beispielhaftes s-t-Diagramm einer Testfahrt

Dazu wurde jeweils der vom System abgeleitete Anzeigemodus aufgetragen. Zu erkennen ist, dass sich zu Beginn der Testfahrt in zwei Situationen der Stillstand nicht vermeiden ließ. Dem Fahrer wurde dies frühzeitig kommuniziert und in der anschließenden Stillstandsphase die Restlaufzeit der Rotphase angezeigt. Zu vier Lichtsignalanlagen lagen dem System bei der Testfahrt keine Daten vor und auch dies wurde dem Fahrer folgerichtig angezeigt.

Bei den Testfahrten wurde erwartungsgemäß festgestellt, dass eine Abweichung in der Zeitsynchronität zwischen Fahrzeug und Server einen erheblichen Einfluss auf die Akzeptanz des Systems hat. Dies macht sich besonders dann bemerkbar, wenn der Fahrer sowohl den Umschaltzeitpunkt der realen LSA, als auch die angezeigte Restphasendauer vergleichen kann. Hier werden Unterschiede von wenigen Sekunden bereits als falsche Information interpretiert. Da Systembedingt mit geringen zeitlichen Abweichungen zu rechnen ist, da die Umschaltzeitpunkte auf der Basis von Prognosedaten berechnet werden, erscheint eine sekundengenaue Restphasenanzeige nicht besonders zielführend. Aus energetischer Sicht sind diese Unsicherheiten jedoch durchaus vertretbar, da dem Fahrer schon frühzeitig ein Geschwindigkeitsbereich empfohlen werden kann, mit dem ein Fahrzeugstillstand verhindert werden kann. Es lässt sich festhalten, dass der verfolgte Ansatz des Systems vielversprechende Möglichkeiten bietet, die Effizienz von Fahrzeugen bei der Bewegung durch urbane Verkehrsräume zu verbessern. Um jedoch eine repräsentative Probandenstudie durchführen zu können, müssen die Algorithmen zur Prognose der Umschaltzeitpunkte und besonders zur Prognose der Rückstaulänge weiter optimiert werden.

2. Nutzen der Ergebnisse

AP 1.4

Die Arbeiten zur Schaltzeitprognose an verkehrsadaptiven Lichtsignalanlagen können als Grundlage weiterer Forschungsaktivitäten verwendet werden. So können Verfahren im Bereich der Verkehrslageschätzung zusätzlich unterstützt bzw. validiert werden. Die Verfahren zur Rückstaulängenprognose sind ein wichtiger Bestandteil beispielsweise bei der qualitativen Betrachtung vorhandener Lichtsignalanlagen Steuerungen (Warte- und Verlustzeiten).

AP 2.1

Die erzielten Ergebnisse können genutzt werden, um für ein serielles Hybridfahrzeug oder ein Elektrofahrzeug mit Range-Extender-Modul eine optimierungsbasierte, modellprädiktive, vorausschauende Betriebsstrategie zu implementieren. Mit dieser ist es möglich nahe am Optimum zu operieren, solange man möglichst genau den zukünftigen Fahrverlauf prognostizieren kann.

AP 3.1

Die im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnissen, vorallem die Softwareumgebung, werden in der Forschung für zahlreiche andere Projekte und Sachverhalte Anwendung finden. Zudem werden vereinzelt Ergebnisse auch in der Lehre insbesondere in der Vorlesungsreihe „Energiemanagement und Betriebsstrategien für mobile und stationäre Energiesysteme“ verwendet.

Das erlangte Wissen im Umgang mit der Microautobox wird zudem in weiterführenden Projekten zur Anwendung kommen. Zudem sind auch Erkenntnisse bei der Anwendung des Active-Force-Feedback Pedals nutzbar z.B. im Projekt „Linie 64“ in dem ein AFFP als Fahrerschnittstelle zur Anwendung kommen soll.

AP 3.3

Die erzielten Erkenntnisse und Ergebnisse können über die Projektlaufzeit hinaus weiter verwendet werden. Neben dem Einsatz in der Lehre kann das System auch für weitere Untersuchungen genutzt werden.

3. Fortschritt bei anderen Stellen

AP 1.4

Die Schaltzeitprognose wird auch in anderen aktuellen F/E Projekten bearbeitet (UR:BAN). Dabei kommen zumeist zusätzliche Detektordaten oder Informationen aus der internen Steuerung zum Einsatz. Im Hinblick auf die Allgemeingültigkeit der Prognose im Rahmen von EFA2014/2 spielten derartigen Betrachtungen nur eine untergeordnete Rolle. Eine Verbesserung der Prognosegenauigkeit ist unter Einbeziehung von zusätzlichen Informationsquellen möglich.

AP 2.1

In der Projektlaufzeit wurde an anderen Stellen begonnen, der Dynamischen Programmierung, als einzige Möglichkeit die optimale Lösung sicher zu ermitteln, zu ersetzen, um schnell im Fahrzeug berechenbar zu sein. Diese Untersuchungen stützen sich vor allem auf den Versuch eine analytische Lösung des Optimierungsproblems zu berechnen. Das gelingt z.B. durch die Nutzung der Konvexen Programmierung [Nue14, Lar14].

Weitere Fortschritte z.B. auch zur Einbeziehung von Emissionsdaten wurden nicht registriert.

AP 3.1

Zahlreiche Projekte sind parallel zum Forschungsprojekt EFA 2014 Phase 2 gelaufen. Zu nennen ist z.B. das Projekt URBAN. Genauere Informationen liegen derzeit nicht vor.

AP 3.3

Die Fortschritte des Arbeitspakets wurden teilweise in Zusammenarbeit mit anderen Stellen (FZI, metaio, BMW) erzielt. Die jeweiligen Fortschritte sind in den Berichten der genannten Stellen zu finden.

4. Veröffentlichungen und studentische Arbeiten

Vorträge

Krumnow, M.: Schaltzeitprognose verkehrsadaptiver Lichtsignalanlagen im Rahmen des Forschungsprojektes EFA 2014/2, 8. VIMOS Konferenz (2012), Dresden

Krumnow, M.: Verkehrsmikrosimulationen mit Echtzeitdaten - Herausforderungen und Chancen, 9. Vimos Konferenz (2013), Dresden

Krumnow, M.: Grünzeitprognosen an LSA - eine wissenschaftliche und praktische Herausforderung am Beispiel des Forschungsprojektes EFA 2014/2, 19. Verkehrstechnisches Seminar (2012), Reinhardtsdorf

Krumnow, M.; Lewerenz, P.; Richter, R.; Schubert, T.; Uebel, S.: Using Online Data from Local Traffic Management Centers to Assist an Energy-Efficient Driving Behavior. 3rd International Conference on Energy Efficient Vehicles (ICEEV 2014), Dresden, 24./25. Juni 2014

Michler, O.: Laborseitige Generierung von HF-/NF-Umfeldsignalen zur Evaluation von Fahrzeugortungskomponenten: Potentiale, Grenzen und Feldtesterfahrungen einer verkehrsträgerübergreifenden Forschungsplattform. Braunschweiger Verkehrskolloquium, 3. Juli 2014

Michler, O.: Verkehrstelematik als Basistechnologie für intelligente Städte – Ausgewählte Innovationen aus der Dresdner Forschungslandschaft. Mobilität der Zukunft – Lösungen für Sachsen auf dem 8. Technologieforum der FDP-Fraktion im Sächsischen Landtag, 7. Mai 2014

Uebel, S.; Tempelhahn, C.; Liebers, M.; Kutter, S.; Bäker, B.: Anwendung der Variationsrechnung für Steuerungsaufgaben im Kraftfahrzeug. at – Automatisierungstechnik, 62.4 (2014): 249-259., 28. März, 2014

Publikationen

Krumnow, M.: Sumo as a Service – Building up a Web service to interact with SUMO, 1st SUMO User Conference (2013), Berlin

Krumnow, M.; Kretschmer, A.: Real-time simulations based on live detector data – Experiences of using Sumo in a Traffic Management System, 1st SUMO User Conference (2013), Berlin

Krumnow, M.; Oertel, R.; Krimmling, J.; Wagner, P.: Microscopic real-time simulation of Dresden using data from the traffic management system VAMOS, ITS World 2012, Wien

Krumnow, M.; Pape, S.; Kretschmer, A.; Krimmling, J.: Schaltzeitprognose verkehrabhängiger Lichtsignalanlagen im Rahmen des Forschungsprojektes EFA 2014/2, Heureka 2014, Stuttgart

Schubert, T.; Krumnow, M.; Bäker, B.; Krimmling, J.: Using Nanoscopic Simulations to validate the Benefit of Advanced Driver Assistance Systems in complex Traffic Scenarios. Proceedings of the 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems 2013, Verkehrstelematik. Vol. 3, TUDpress, Dresden, 2013, ISBN: 978-3-944331-34-8

Schubert, T.; Uebel, S.; Krumnow, M.; Bäker, B.; Krimmling, J.: Analyse eines LSA-Assistenzsystems mittels nanoskopischer Simulation in komplexen Verkehrsszenarien. AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig, 12.-13. Februar, 2014

Studentische Arbeiten

Diplomarbeit Martin Prusas: Erweiterung einer optimierungsbasierten Betriebsstrategie um die Optimierung von Schadstoffemissionen – 2014

Diplomarbeit Jinyi He: Modellierung einer Permanentenerregten Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten – 2013

Diplomarbeit Robert Kloß: Modellierung einer Motor-Generator-Einheit für ein Extended Range Electric Vehicle (EREV) – 2013

Oberseminar Christian Sohn: Elektrofahrzeugarchitekturen mit Range-Extender – 2012

Oberseminar Thomas Herkner: Elektro- und Hybridfahrzeuguntersuchungen in der Fachpresse – 2013

Oberseminar Julius Wystemp: Gesetzliche Abgasnormen heute und in Zukunft – 2014

Projektarbeit Verkehrssteuerungs- und -leittechnik Maria Reiche: Ermittlung der Emissionsbelastung der Kreuzung Teplitzer Straße/ Zellescher Weg in Dresden mit Hilfe der Simulationssoftware SUMO – 2012

Projektarbeit Verkehrssteuerungs- und -leittechnik Anja Arlt: Realitätsnahe Simulation des Verkehrsflusses auf der Süd-West-Umfahrung in Dresden unter Einsatz der Messwerte der vorhandenen Pegelzählstellen und den Schaltinformationen der eingesetzten Lichtsignalanlagen – 2012

Projektarbeit Verkehrssteuerungs- und -leittechnik Anika Borchmann: Programmtechnische Umsetzung eines Verfahrens zur Rückstaulängenschätzung unter Verwendung halteliniennaher Detektoren – 2013

Projektarbeit Verkehrssteuerungs- und -leittechnik Wolfram Keil: Programmtechnische Umsetzung einer Benutzeroberfläche zur Visualisierung von LSA-bezogenen Kenngrößen – 2013

Projektarbeit Verkehrssteuerungs- und -leittechnik Georg Fritzsich: Programmtechnische Umsetzung eines Verfahrens zur Rückstaulängenschätzung mit FCD – 2013

Projektarbeit Verkehrssteuerungs- und -leittechnik Evamarie Wießner: Analyse der Datenmengen der Car-2-Infrastructure Kommunikation durch realitätsnahe Simulation unterschiedlicher Testszenarien – 2013

Hauptseminar Evamarie Wießner: Realitätsnahe Simulation des Dresdner Straßenbahnnetzes mit der Simulationssoftware SUMO – 2013

Studienarbeit Carmen Gobsch: Konzipierung eines Verfahrens zur Rückstaulängenermittlung auf Basis historischer Floating Car Daten und LSA Schaltdaten – 2013

Diplomarbeit Anja Arlt: Erarbeitung eines Konzeptes zur Anpassung verkehrsabhängiger LSA-Steuerungen an die Erfordernisse der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (V2I) – 2013

Diplomarbeit Maria Reiche: Simulative Untersuchung der Auswirkungen einer möglichen Interaktion zwischen kooperativen Lichtsignalanlagen und den Verkehrsteilnehmern unter besonderer Berücksichtigung des ÖPNV – 2013

Diplomarbeit Andy Szafran – Untersuchungen zum Kaltstart- Warmlaufverhalten an Ottomotoren bei Range-Extender Betrieb – 2013

Diplomarbeit Benjamin Deschner: Simulation von Abgasemissionen beim Kaltstart eines Range-Extenders – 2013

Studienarbeit Michael Mandausch: Aufbau und Inbetriebnahme eines für Range-Extender-Betrieb vorgesehenen Versuchsträgers – 2013

Studienarbeit Mario Witopil: Simulation des Kaltstart- Warmlaufverhaltens eines Range Extenders – 2014

Diplomarbeit Dennis Einert: Experimentelle Untersuchungen zum Kaltstart- Warmlaufverhalten an einem Range-Extender Versuchsträger – 2014

Diplomarbeit: Marcel Buchin - Entwicklung und Programmierung von generischen Darstellungselementen eines Forschungsfahrzeuges – 2014

Diplomarbeit: Erik Schwirblat - Modellierung und Simulation eines Fahrer-Fahrzeug-Umwelt Modells zur Untersuchung des Einflusses der Fahrweise auf den Energiebedarf – 2012

Großer Beleg: Erik Gebauer - Modellierung und Simulation eines Fahrer-Längsdynamik-Modells – 2012

Oberseminar: Sven Kriegel - Recherche zu Darstellungsformen unscharfer Informationen in Assistenzsystemen von Kraftfahrzeugen – 2013

Studienarbeit: Johannes Richter - Modellierung und Simulation eines Modells zur Berechnung des Effizienzsteigerungspotentials durch dynamische Routenführung von Kraftfahrzeugen – 2013

IV. Literaturverzeichnis

- [And12] Andert, Jakob; Köhler, Eduard; Niehues, Jürgen und Schürmann, Gregor: „Range Extender von KSPG - Ein neuer Wegbereiter der Elektromobilität“. In: MTZ - Motortechnische Zeitschrift (2012).
- [Arl13] Arlt, Martin: „IAD Kolloquium: Die Zukunft der nachhaltigen Mobilität“. 30. Jan. 2013.
- [Asa10] Asadi, B.; Vahidi, A.: *Predictive Cruise Control: Utilizing Upcoming Traffic Signal Information for Improved Fuel Economy and Reducing Trip Time*, Vol 19. In: IEEE Transactions and Control Systems Technology, S. 707–714, 2010.
- [Bac05] Back, M.: Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2005.
- [Bis11] Bisordi, Andre: Range Extender Engine Development Using GT-Suite. Forschungsber. MAHLE Powertrain, 2011.
- [Ble11] Bley, O.; Kutzner, R.; Friedrich, B.: *Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung*. In: AAET 2011 Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, 2011.
- [Bol89] BOLTZE, M.(1989): Optimierung von Umlaufzeiten in der Lichtsignalsteuerung für Straßennetze. in: Straßenverkehrstechnik, Nr.6, 1989, S. 203-207.
- [BRU12] BRUSA Elektronik AG (Hrsg.): BRUSA: Golf REX eQmotion. 24. Juli 2012. Url: <http://www.brusa.biz/index.php?id=326>.
- [BS11] Bäker, Bernard und Schubert, Torsten: Energieeffizientes Fahren 2014 (EFA2014). 2. Projektphase - Erhöhung der Reichweite von Elektrofahrzeugen. Teilvorhabensbeschreibung V.8. Technische Universität Dresden, 2011.
- [Buß12] Buß, Katja: „Reichweitenverlust von Elektrofahrzeugen durch Berücksichtigung von Hilfsaggregaten“. In: Mechatronik Mobil (2012).
- [Cas08] Cassebaum, O., Schuricht, P., Bäker, B.: Modellprädiktive Regelung als Ansatz für eine effiziente Betriebsführung von Hybridfahrzeugen. 4. Fachtagung Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren – AUTOREG 2008, Baden-Baden, 2008.
- [DD11] Stadt Dresden (2011): 50 Jahre Lichtsignalanlagen in Dresden; Pressemitteilung. URL: http://www.dresden.de/de/02/035/01/2011/12/pm_05_7.php; Zugriffsdatum: 10.01.2014.
- [DD14] Stadt Dresden (2014): Stadt, Verwaltung & Rat – Statistik & Geodaten - Bevölkerung und Gebiet; URL: <http://www.dresden.de/de/02/06/bevoelkerung.php>; Zugriffsdatum: 10.04.2014.

- [Dit11]** DITTRICH, C.; BUSCH, F.: "Rückstaulängenschätzung zur verbesserten Geschwindigkeitsempfehlung im Fahrzeug". HEUREKA '11 "Optimierung in Verkehr und Transport" - Tagungsdokumentation, FGSV Verlag, Köln, 2011, ISBN 978 3 941790 72 8.
- [Ebe05]** Ebersbach, D.: „Entwurfstechnische Grundlagen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit“. Diss. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ - Technische Universität Dresden, 2005.
- [Eco08]** Economic and Social Council: European Agreement On Main International Traffic Arteries (AGR). Abkommen. United Nations, 2008.
- [EMM11]** Emmanouil Koukoumidis, Li-Shiuan Peh, Margaret Martonosi: SignalGuru: Leveraging Mobile Phones for Collaborative Traffic Signal Schedule Advisory URL: http://www.koukoumidis.com/papers/Koukoumidis_SignalGuru_MobiSys_2011.pdf
- [EWG07]** Verordnung 715/2007/EG; Ergänzende Verordnung 692/2008/EG, 595/2009/EG, 566/2011/EU, 459/2012/EU.
- [FGS09]** Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (2009): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: HBS. FGSV-Verl., 2009.
- [FGS10]** Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2010): Richtlinien für Lichtsignalanlagen/RiLSA, Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr; In: FGSV; 321:R1; Ausgabe 2010; Köln: FGSV.
- [FR94]** Föllinger, Otto und Roppenecker, Günter: Optimale Regelung und Steuerung. Hrsg. von Otto Föllinger; Hans Sartorius und Volker Krebs. 3., verbesserte Auflage. R. Oldenbourg, 1994.
- [Fra13]** Franz, Martin: „EU-Parlament fordert: Autos sollen leiser werden“. In: heise Autos (2013). Hrsg. von heise Autos.
- [FRI11]** FRIEDRICH, B.; MAURER, M. (2011): Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung.
- [Gas13]** GASSEL, C.; KRIMMLING, J. (2013): Effects of Cooperative Traffic Signals on Tramway Systems In: Proceedings of 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (2013) p.301-310.
- [Gau13]** Gaul, Bernhard: GPXViewer GPS-Track in Google Maps oder OSM-Karte anzeigen. 2. Jan. 2013. Url: <http://www.bernhard-gaul.de/gpxviewer/gpxviewer.php>.
- [GN11]** Grebe, Uwe D. und Nitz, Larry T.: „Voltec - Das Antriebssystem für Chevrolet Volt und Opel Ampera“. In: MTZ - Motortechnische Zeitschrift (2011).
- [Gop13]** Goppelt, Gernot: „Drei Große treiben die Brennstoffzellentechnik voran“. In: heise Autos (2013).

- [Gru10]** von Grundherr zu Altenthan und Weiyherhaus, J.: Ableitung einer heuristischen Betriebsstrategie für ein Hybridfahrzeug aus einer On-line-Optimierung. Dissertation, TU München, München, 2010.
- [GSS11]** Genender, Peter; Speckens, Friedrich-Wilhelm und Schürmann, Gregor: „Akustikentwicklung von Range Extendern für Elektrofahrzeuge“. In: MTZ – Motortechnische Zeitschrift (2011).
- [HHB11]** Hüpkes, Stefan; Hillebrand, Georg und Brings, Wolfgang: „Flexibler Antriebsstrang für Elektrofahrzeuge“. In: MTZ - Motortechnische Zeitschrift (2011).
- [Joh09]** Johannesson, L.: Predictive Control of Hybrid Electric Vehicles on Prescribed Routes. Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden, 2009.
- [Jun12a]** Jung, Merten; Kessler, Frank; Müller, Patrick und Wahl, Stefan: „Fahrzeugintegration und Fahrverhalten des BMW Active E“. In: MTZ - Motortechnische Zeitschrift (2012).
- [Jun12b]** Jung, Merten; Merwerth, Jörg; Ueberle, Hendrik und Vogel, Frank: „Der elektrische Antrieb des BMW Active E“. In: MTZ - Motortechnische Zeitschrift (2012).
- [Kes07]** Kessels, J.: Energy Management for Automotive Power Nets, Dissertation, TU Eindhoven, Eindhoven, Niederlande, 2007.
- [Kno09]** Knoll, P (2009): Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme; In: Handbuch Fahrerassistenzsysteme; 1. Auflage; Vieweg + Teubner; GWV Fachverlage GmbH; Wiesbaden; S. 330-342.
- [Kra12]** Krajzewicz, D.; Erdmann, J.; Behrisch, M.; Bieker, L.: *Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility*. In: International Journal On Advances in Systems and Measurements, 5 (3&4): 128-138, 2012.
- [KRU12]** KRUMNOW, M. (2012): Schaltzeitprognose verkehrsadaptiver Lichtsignalanlagen im Rahmen des Projektes EFA 2014/ 2. VIMOS-Tagung vom 29.11.2012, Dresden.
- [KRU13]** KRUMNOW, M. (2013): Die Ampeln der Stadt verkehrabhängig steuern. Dresdner Universitätsjournal vom 26.03.2013.
- [Kru13a]** Krumnow, M.: *Sumo as a Service – Building up a Web service to interact with SUMO*. In: Proceedings of the 1st SUMO User Conference SUMO2013, Reports of the DLR-Institute of Transportation Systems, Vol. 21. May 15.-17, Berlin, 2013.
- [Kru13b]** Krumnow, M.: *Verkehrsmikrosimulation mit Echtzeitdaten – Herausforderungen und Chancen*, 9. VIMOS, Dresden, 2013.
- [Kut10]** Kutter, S., Bäker, B.: Predictive Online Control for Hybrids - Resolving the conflict between global optimality robustness and real-time capability. 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, France, 2010.

- [Kut12]** Kutter, Steffen: „Optimierungsbasierte Betriebsführung von autarken und Plug-In Hybridfahrzeugen“. Diss. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ - Technische Universität Dresden, 2012.
- [Lar14]** Larsson, V.; Johannesson, L.; Egardt, B., "Analytic Solutions to the Dynamic Programming sub-problem in Hybrid Vehicle Energy Management", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. PP, no. 99, pp. 1,1.
- [Liu09]** Liu, Henry X; Wu, Xinkai; Ma, Wenteng; Hu, Heng: "Real-time queue length estimation for congested signalized intersections", *Transportation Research Part C*, vol. 17, p.412-427, Elsevier GmbH, München, 2009.
- [Lot12]** Lotus Engineering (Hrsg.): Range Extender Engines. 24. Juli 2012. Url: <http://www.lotuscars.com/engineering/range-extender-engines>.
- [May04]** Mayser, Christoph; Lippold, Christian; Ebersbach, Dirk und Dietze, Matthias: Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung der Längsregelung im ungebundenen Verkehr. Forschungsber. BMW Group Forschung und Technik und TU Dresden - Lehrstuhl zur Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen, 2004.
- [Mis08]** Mischke, Werner: „Vorlesung Kraftfahrzeugtechnik I. Längsdynamik“. Vorlesung. Technische Universität Dresden - Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik, 2008.
- [MOR09]** MÖRNER, J.; LEOPOLD, A. VESPER, A. (2009): Befragung zum Betrieb von Lichtsignalanlagen und deren Steuerung in innerstädtischen Straßennetzen. Shaker Verlag Aachen, 2009.
- [Mue02]** Mück, Jürgen: „Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren“, *Straßenverkehrstechnik*, 11/2002, p. 613-618, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn, 2002.
- [PAP10]** PAPE, S., (2010): Untersuchungen zur Rekonstruktion von LSA Signalprogrammen unter Nutzung von Datensätzen des Sipl.-Online-Datenstroms, Technische Universität Dresden.
- [PAP12]** PAPE, S. (2012): Untersuchung und Umsetzung eines Verfahrens zur Prädiktion von Freigabezeiten an verkehrsabhängig gesteuerten LSA. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2012.
- [Pru14]** Prusas, Martin: „Erweiterung einer online-fähigen Betriebsstrategie um Optimierung der Emissionen“. Diplomarbeit. TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN - Fakultät Elektrotechnik - Institut für Automobiltechnik Dresden, 2014.
- [Res05]** Ress, C.; Balzer D.; Bracht, A.; Durekovic, A.; Löwenau, J.: *ADASIS Protocol for advanced in-vehicle applications*, ADASIS-Forum, 2005.
- [Reu13]** Reuter, Benjamin: Energie: Woran die Wasserstoffrevolution scheitern könnte. Hrsg. von Wirtschaftswoche. 14. Jan. 2013. Url: <http://green.wiwo.de/energieworan-die-wasserstoffrevolution-scheitern-konnte/>.

- [Sac08]** Sacher, Heike: „Gesamtheitliche Analyse des Bedienverhaltens von Fahrzeugfunktionen in der täglichen Nutzung“. Diss. Fakultät für Maschinenwesen – Technische Universität München, 2008.
- [SCH01]** SCHLITTEGEN, R. (2001): Angewandte Zeitreihenanalyse. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2001.
- [Sch10]** Schubert, T.: *Entwurf und Evaluierung einer prädiktiven Fahrstrategie auf Basis von Ampel-Fahrzeug-Kommunikationsdaten*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2010.
- [Sch11]** Schuricht, P.; Michler, O.; Bäker, B.: *Efficiency-increasing driver assistance at signalized intersections using predictive traffic state estimation*. In: 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). DOI: 10.1109/ITSC.2011.6083111, S. 347 – 352, 2011.
- [Sch12]** Schürmann, Gregor; Eisele, Georg; Genender, Peter und Wolff, Klaus: „Geräuscharme Range Extender für Elektrofahrzeuge“. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift (2012).
- [Sch13]** Schubert, T.; Krumnow, M.; Bäker, B.; Krimmling, J.: *Using Nanoscopic Simulations to validate the Benefit of Advanced Driver Assistance Systems in complex Traffic Scenarios*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems 2013, Verkehrstelematik. Vol. 3, TUD-press, Dresden, ISBN: 978-3-944331-34-8, 2013.
- [Sch14]** Schubert, T.; Uebel, S.; Krumnow, M.; Bäker, B.; Krimmling, J.: *Analyse eines LSA-Assistenzsystems mittels nanoskopischer Simulation in komplexen Verkehrsszenarien*. AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig, 12.-13. Februar, 2014.
- [Ser09]** Serrao, Lorenzo: „A comparative analysis of energy management strategies for hybrid“. Diss. The Ohio State University, 2009.
- [Spo13]** spotpress: „Neue Range Extender-Technik. Mehr Reichweite für Elektroautos“. In: MOTOR-TALK.de (20. Feb. 2013).
- [STE12]** STEYR MOTORS GmbH (Hrsg.): Biodiesel Range-Extender with STEYR power. 24. Juli 2012. URL: <http://www.steyr-motors.com/news/news-single/biodiesel-range-extender-with-steyr-power/0b06dcec616d47dcebec9427b8387296/>.
- [Sti08]** Stiegeler, M.: Entwurf einer vorausschauenden Betriebsstrategie für parallele hybride Antriebsstränge. Dissertation, Universität Ulm, Ulm, 2008.
- [Tsc11]** Tschöke, Helmut: Range Extender. Geeignete Konzepte. Forschungsber. Institut für Mobile Systeme (IMS) - Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2011.
- [Ueb10]** Uebel, Stephan: „Entwicklung einer Betriebsstrategie für eine Motor-Generator-Einheit“. Diplomarbeit. TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN - Fakultät Elektrotechnik - Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, 2010.

- [Ueb14]** Uebel, S.; Tempelhahn, C.; Liebers, M.; Kutter, S.; Bäker, B.: Anwendung der Variationsrechnung für Steuerungsaufgaben im Kraftfahrzeug. at – Automatisierungstechnik, 62.4 (2014): 249-259., 28. März, 2014.
- [Vig10]** Vigos, Georgios; Papageorgiou, Markos: „A simplified estimation scheme for the number of vehicles in signalized links“, IEEE Transactions on intelligent transportation systems, vol. 11, no.2, 2010.
- [Voe10]** Voelcker, John: BMW Project Megacity: Ultimate (Electric, Urban) Driving Machine. Hrsg.: Green Car Reports. 22. Feb. 2010. Url: http://www.greencarreports.com/news/1042808_bmw-project-megacity-ultimate-electric-urban-driving-machine.
- [Wil09]** Wilde, A.: Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen. Dissertation, TU München, München, 2009.
- [Win08]** Winde, Knut: „Entwicklung eines adaptiven Fahrermodells für die Längsdynamiksimulation von Kraftfahrzeugen“. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden - Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“- Institut für Automobiltechnik Dresden (IAD) - Lehrstuhl für Fahrzeugmechatronik, 2008.
- [Wu96]** Wu, Ning: „Rückstaulängen an Lichtsignalanlagen unter verschiedener Verkehrsbedingungen“, Straßenverkehrstechnik, 5/1996, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn, 1996.