

Jürgen Krimmling, Birgit Jaekel und Martin Lehnert (Hg.)
Aspekte der Verkehrstelematik – ausgewählte Veröffentlichungen 2014

Verkehrstelematik | 5

Hg. von Jürgen Krimmling und Martin Lehnert

Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Verkehrstelematik
Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling
Tel.: +49 351 463-36784
E-Mail: Juergen.Krimmling@tu-dresden.de
<http://tu-dresden.de/vlp>

J. Krimmling, B. Jaekel und M. Lehnert (Hg.)

**Aspekte der Verkehrstelematik –
ausgewählte Veröffentlichungen 2014**

TUD*press*

2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Inter-
net at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-031-6

© 2015 TUDpress
Verlag der Wissenschaften GmbH
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19
<http://www.tudpress.de>

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Gesetzt von den Herausgebern.
Printed in Germany.

Vorwort

Das Jahr 2014 war für die Professur für „Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung“ des Institutes für Verkehrstelematik durch den Abschluss einiger bislang dominierender Projekte gekennzeichnet. Wir verabschiedeten einige Mitarbeiter und durften uns über die Aufnahme neuer Kollegen freuen, mit denen gemeinsam wir nun den Blick in die Zukunft richten. Auf Projektebene bedeutete dies, dass das EU-FP7-Projekt ON-TIME endete und vom EU-FP7-Projekt Capacity4Rail mit sehr breiter inhaltlicher Ausrichtung abgelöst wurde. Ebenso wurde mit dem 15-jährigen Jubiläum von VAMOS auch dessen 2. Ausbauphase abgeschlossen, begleitet von neuen Ideen und Projekten zur Erweiterung und Instandhaltung der Plattform. Und schließlich fand mit der produktiven Inbetriebnahme des Fahrerassistenzsystems und der kooperativen, qualitätsgerechten Lichtsignalsteuerung ein weiteres Projekt einen erfolgreichen Abschluss, so dass mit den Arbeiten an der nächsten Ausbaustufe begonnen werden konnte.

Inhaltlich zeichnet sich der Lehrstuhl nicht nur durch seine Praxisnähe, sondern auch durch seine multimodale Betrachtung der Probleme und Lösungsansätze im Verkehrswesen aus. So finden sich in diesem Band Beiträge zu Fahrerassistenzsystemen der Bereiche Schienenverkehr, öffentlicher Personennahverkehr und motorisierter Individualverkehr. In zahlreichen Vorträgen und Veröffentlichungen auf nationaler sowie internationaler Ebene wurden die Forschungstätigkeiten des Lehrstuhls vorgestellt. Eine Auswahl davon finden Sie im vorliegenden Sammelband unserer Schriftenreihe.

Einen ersten Schwerpunkt im Band bilden die Veröffentlichungen zum Verkehrsmanagementsystem VAMOS der Stadt Dresden und der Nutzung dessen Datenbasis. Innovationen um das VAMOS finden Sie in den ersten fünf Beiträgen des vorliegenden Bandes.

Neben den Fragestellungen zum Design von Software- und Datenschnittstellen sowie zur Datenerfassung und -auswertung widmet sich ein zweiter Themenkomplex dem Erzeugen von Verkehrsdaten durch Simulationen, die anhand realer Daten kalibriert wurden oder werden. Diese Ansätze werden ebenfalls für verschiedene Verkehrsträger verfolgt, zum Beispiel bei der Zugfahrtsimulation, der Reduktion von Leistungsspitzen im Nahverkehr oder als LSA-Assistenzsystem für den MIV.

Mehrere Vorträge zum abgeschlossenen Projekt ON-TIME geben einen umfassenden Einblick in die Ergebnisse dieses Projektes und runden den Band ab. Dabei steht das entwickelte Softwareframework mit den Schwerpunkten Softwarearchitektur, Integration von Verkehrsmanagement und Fahrerassistenz, Definition von Datenschnittstellen und Protokollen, sowie der Fahrplanbewertung und -optimierung im Fokus.

Ich wünsche Ihnen nun viel Vergnügen bei der Lektüre des fünften Bandes der Reihe „Verkehrstelematik“. Bitte wenden Sie sich bei Fragen und Anregungen gern an mich oder einen meiner Mitarbeiter.

Dresden im Oktober 2015

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling

Inhaltsübersicht

Das Dresdner Verkehrsmanagementsystem VAMOS	1
<i>(Jürgen Krimmling)</i>	
Schaltzeitprognose verkehrsabhängiger Lichtsignalanlagen im Rahmen des Forschungsprojektes EFA 2014/2	7
<i>(Mario Krumnow, Sebastian Pape, Andreas Kretschmer, Jürgen Krimmling)</i>	
Analyse eines LSA-Assistenzsystems mittels nanoskopischer Simulation in komplexen Verkehrsszenarien	21
<i>(Torsten Schubert, Mario Krumnow, Stephan Uebel, Bernard Bäker, Jürgen Krimmling)</i>	
Using Online Data from Local Traffic Management Centers to Assist an Energy-Efficient Driving Behavior	31
<i>(Mario Krumnow, Robert Richter, Per Lewerenz, Torsten Schubert, Stephan Uebel)</i>	
Steigerung der ÖPNV-Qualität durch kooperative Ampelanlagen	45
<i>(Christian Gassel, Björn Schönherr, Tobias Matschek, Jürgen Krimmling)</i>	
Kostensenkung durch Reduktion von Leistungsspitzen bei Gleichstrombahnen	61
<i>(Martin Lehnert, Thomas Albrecht, Lutz Langerwisch)</i>	
ON-TIME – A framework for integrated railway network operation management	77
<i>(Thomas Albrecht, Meena Dasigi)</i>	
Mehrkriterielle Fahrplanbewertung und -optimierung unter Berücksichtigung der stochastischen Eigenschaften der Fahrgastwechselzeit	91
<i>(Anne Binder, Jürgen Krimmling, Thomas Albrecht)</i>	
Verfahren und Architekturen zur Integration von Verkehrsmanagement- und Assistenzsystemen bei Eisenbahnen	101
<i>(Birgit Jaekel, Thomas Albrecht)</i>	
Operational Railway Management as Part of an Integrated Railway Management Process	113
<i>(Birgit Jaekel, Thomas Albrecht)</i>	
Comparative Analysis of Algorithms and Models for Train Running Simulation	121
<i>(Birgit Jaekel, Thomas Albrecht)</i>	
Mitarbeiter der Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung	151

Das Dresdner Verkehrsmanagementsystem VAMOS

Jürgen Krimmling

Technische Universität Dresden

Dieser Beitrag wurde veröffentlicht in: Michael Sandrock und Gerd Riegelhuth (Hrsg.): Verkehrsmanagementzentralen in Kommunen – Eine vergleichende Darstellung. Springer Vieweg : Wiesbaden, 2014. S. 157–197. – ISBN: 978-3-658-04390-2

1 Organisationsform und Rahmenbedingungen

1.1 Aufgabenstellung und Ziele

Das Dresdner Verkehrsmanagementsystem VAMOS wurde im Rahmen des Forschungsprojektes *intermobil* Region Dresden entwickelt und aufgebaut. Die Abkürzung VAMOS steht für Verkehrs-, Analyse-, Management- und Optimierungs-System, worin sich auch die einzelnen Aufgabenbereiche des Systems widerspiegeln. Als übergeordnete Zielstellung wurde der Aufbau eines intermodalen und baulasträgerübergreifenden Verkehrsmanagementsystems für die gesamte Region Dresden formuliert. Entstanden ist ein Verkehrsmanagementsystem, welches über die Stadtgrenzen Dresdens hinaus und verkehrsträgerübergreifend wirksam ist. Es werden sowohl die aktuellen Verkehrssituationen und die verkehrlichen Wechselwirkungen zwischen dem innerstädtischen Verkehr und dem Verkehr auf den stadtnahen Autobahnen A4 und A17 erfasst und beeinflusst als auch die aktuellen Verkehrssituationen und die verkehrlichen Wechselwirkungen zwischen dem IV und dem ÖV. Das beinhaltet natürlich auch einen intensiven Informationsaustausch zwischen den einzelnen Komponenten und die Übertragung von Verkehrsinformationen an die verschiedenen Nutzergruppen.

Im Einzelnen dient das VAMOS-System den klassischen Zielstellungen von Verkehrsmanagementsystemen, also der Sicherung guter Verkehrsqualitäten im Netz, der verkehrsträgerübergreifenden Verkehrsinformation, der Verkehrsflussoptimierung sowie der Verkehrssteuerung und -lenkung in Ereignisfällen. Mit Hilfe der Kenntnis über die durch die VAMOS-Komponenten erfasste und ausgewertete aktuelle Verkehrslage sollen die Nutzer in die Lage versetzt werden, den Fahrtzeitpunkt, die Verkehrsmittelwahl und die Fahrtroute entsprechend den jeweiligen Erfordernissen und der aktuellen Situation optimal auszuwählen. Dadurch wird sowohl eine individuelle als auch eine optimale Verkehrssituation im Gesamtsystem angestrebt. Mit der Optimierung der Gesamtverkehrslage dient das VAMOS-System

gleichermaßen der Verbesserung der Umweltsituation, indem die verkehrsbedingten Emissionen minimiert werden. Durch die Gewährleistung optimaler Verkehrsverhältnisse leistet es ebenfalls einen Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und für die Sicherung des Wirtschaftsstandortes Dresden.

1.2 Rechtliche Grundlagen und sachliche Zuständigkeit

Das VAMOS-System wurde in einer Kooperation zwischen mehreren Partnern zunächst im Rahmen des Forschungsprojektes *intermobil* Region Dresden konzipiert und danach schrittweise aufgebaut. Die wesentlichen Partner bei Entwicklung und Aufbau des VAMOS-Systems waren und sind die folgenden Institutionen:

- der Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung der TU Dresden,
- das Straßen- und Tiefbauamt der Landeshauptstadt Dresden (STA),
- die Dresdner Verkehrsbetriebe AG (DVB),
- das Landesamt für Straßenbau und Verkehr des Freistaates Sachsen (LASuV, vormals Autobahnamt Sachsen),
- die Taxigenossenschaft Dresden,
- weitere Ämter der Stadt Dresden (Vermessungsamt, Straßenverkehrsbehörde),
- die Verkehrsverbund Oberelbe GmbH sowie
- das Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI.

Bereits während des Forschungsprojektes konnten erste Komponenten des Verkehrsmanagementsystems praktisch erprobt werden, so dass sich alle Partner zur Fortführung und Weiterentwicklung des Systems nach Beendigung des Forschungsprojektes entschlossen. Dazu wurden entsprechende Stadtratsbeschlüsse gefasst, die z. B. die Beteiligung der städtischen Partner untersetzen.

Für die einzelnen Komponenten des Verkehrsmanagementsystems ist zunächst jeder der beteiligten Partner im Rahmen seiner Verantwortlichkeit zuständig. So liegen sämtliche Komponenten des Straßenverkehrsmanagementsystems der Stadt (z. B. Detektoren, Verkehrsinformationstafeln, dynamische Wegweiser, Rechner- und Netzwerkkomponenten) in der Obhut des STA. Die Verkehrsmanagementkomponenten auf den BAB A4 und A17 (z. B. Verkehrs- und Streckenbeeinflussungsanlagen, Tunnelsteuerungen, Videokameras, Datenübertragungskomponenten) liegen in der Verantwortung des LASuV und das RBL-System wird von den Verkehrsbetrieben betreut. Der Datenaustausch wurde unbürokratisch auf der Basis der partnerschaftlichen Zusammenarbeit geregelt und realisiert.

Die TU Dresden pflegt und betreibt einen Teil der Rechner- und Softwarekomponenten im Auftrag des STA. Dabei handelt es sich insbesondere um die Verkehrsdatenbank und die Verkehrsdatenauswertung sowie um die Ansteuerung der Aktorik des VAMOS-Systems

(z. B. Verkehrsinformationstafeln, dynamische Wegweiser und Parkpfeile, sowie spezielle LSA-Steuerungen, wie Signalprogrammauswahl bzw. verkehrslageabhängige Schaltung von LSA-Freigabefenstern für den ÖPNV). Darüber hinaus werden die Weiterentwicklung des Systems und die Ergänzung neuer Komponenten von der TU Dresden konzipiert und teilweise entwickelt, wie z. B. das grafische Elbebrückeninformationssystem.

1.3 Organisation

Das VAMOS-System stellt einerseits eine Verbindung zwischen den verschiedenen Komponenten der einzelnen Partner her, andererseits wurden im Rahmen des Aufbaus des VAMOS-Systems neue Verkehrsmanagementkomponenten entwickelt und in die Praxis überführt. In Abbildung 1 ist eine schematische Übersicht des VAMOS-Systems dargestellt.

So gab es bereits vor dem Aufbau des VAMOS-Systems im STA der Stadt Dresden eine Leitzentrale zur Betriebsüberwachung der Lichtsignalanlagen, ein dynamisches Parkleit- und Informationssystem und Detektoren zur statistischen Verkehrserfassung. Bei den Verkehrsbetrieben existierte ein RBL-System und auf der BAB A4 gab es eine VBA und eine Leitzentrale. Eine Aufgabe des Forschungsprojektes *intermobil* war die Vernetzung der einzelnen Zentralen, um den gegenseitigen Datenaustausch zu ermöglichen. Um die Vernetzung der vorhandenen Zentralen zu realisieren, wurde auf vorhandene Datenübertragungsleitungen des STA im Stadtgebiet zurückgegriffen und dies auf Glasfasertechnologie umgerüstet. Zudem wurde der Ausbau von Verkehrsinfrastrukturanlagen, wie der Neubau der A17 und verschiedener Autobahnzubringer, für die Realisierung der Zentralenverbindungen zwischen der Stadt und dem Autobahnamt genutzt.

Darüber hinaus wurden weitere Komponenten und Funktionalitäten für das Verkehrsmanagementsystem neu aufgebaut und ergänzt, wie das Verkehrsinformationssystem oder das dynamische Wegweisungssystem.

Somit stellt sich das VAMOS-System als ein vernetztes System mehrerer Verkehrsmanagementzentralen dar, über die einerseits Verkehrsdaten der einzelnen Partner erfasst werden andererseits Verkehrsinformationen verbreitet oder Verkehrssteuerungsmaßnahmen umgesetzt werden. Zu den im VAMOS-System vernetzten Systemen gehören die:

- Verkehrsmanagementzentrale des STA Dresden und die VAMOS-Zentrale an der TU Dresden,
- RBL-Zentrale der DVB,
- Leitzentrale für die Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA) A4 und Streckenbeeinflussungsanlage (SBA) A17 im LASuV,
- Leitzentrale der Taxi-Genossenschaft sowie
- Landesmeldestelle des Sächsischen Staatsministerium des Innern (Verkehrsfunk).

Die Verkehrsmanagementzentrale im STA Dresden und die VAMOS-Zentrale an der TU Dresden stellen die Hauptkomponenten des VAMOS-Systems dar. In der VMZ des STA

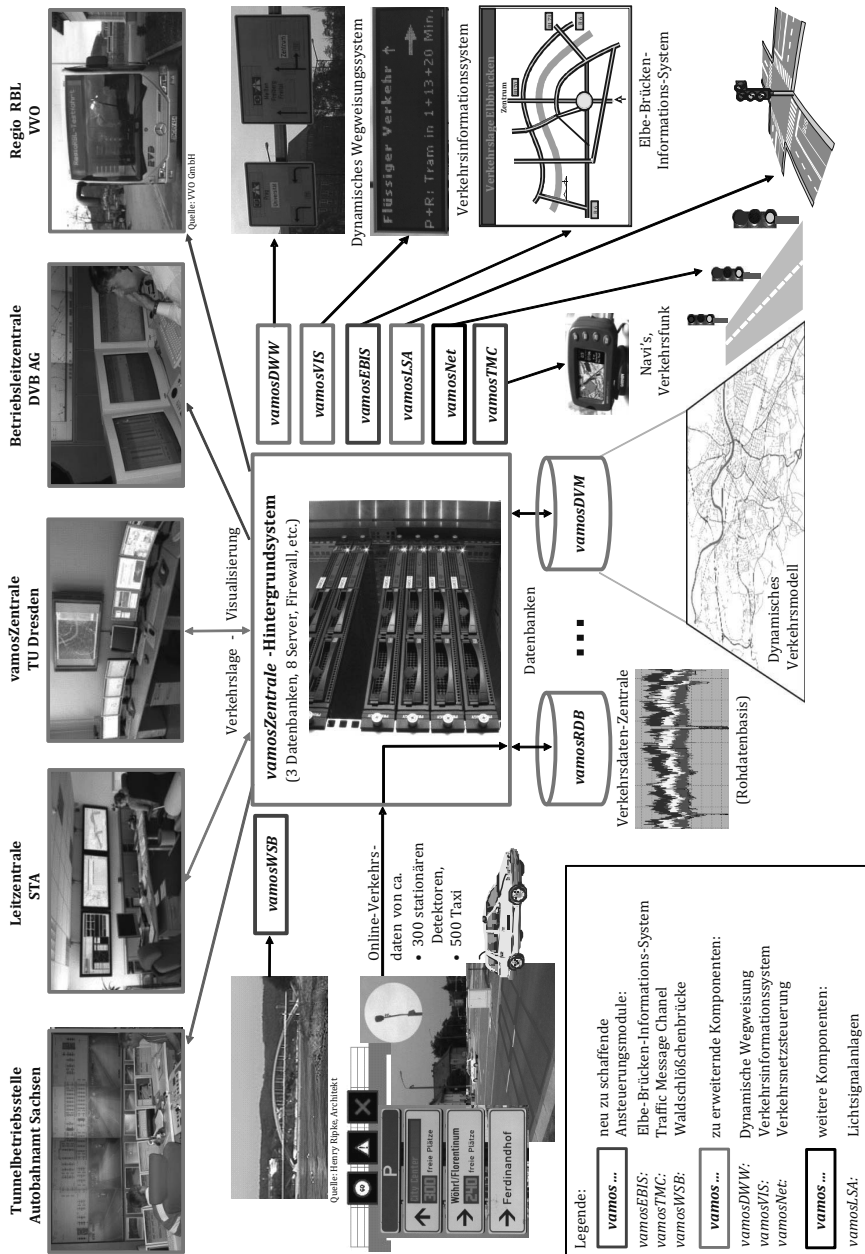


Abbildung 1: Schematische Übersicht des VAMOS-Systems.

sind sämtliche Systeme für die Verkehrsdatenerfassung und für die Verkehrssteuerung miteinander vernetzt. Das betrifft neben den Detektionssystemen für die Dauerzählstellen und die Infrarotdetektoren (TEU) das Überwachungssystem für die LSA, das Parkleit- und -informationssystem, die Tunnelüberwachungs- und Steuerungssysteme, das dynamische Verkehrsinformationssystem, das dynamische Wegweisungssystem und das Elbebrückeninformationssystem. In der VAMOS-Zentrale sind der zentrale Verkehrsdatenbankserver sowie die Server zur Auswertung der Verkehrsdaten und Ermittlung der Gesamtverkehrslage und zur Auswahl der Schalt- und Steuerungsstrategien für die einzelnen Systeme installiert. Von der VAMOS-Zentrale aus erfolgen somit zunächst über das Datennetz des STA die Steuerung der einzelnen Verkehrsmanagementkomponenten und die Beeinflussung des Verkehrs und der Verkehrsteilnehmer.

1.4 Finanzierung

Die Entwicklung und der Aufbau der ersten Stufe des VAMOS-Systems in der Region Dresden erfolgten im Rahmen des Forschungsprojektes *intermobil* Region Dresden, welches vom BMBF gefördert und mit Eigenmitteln des Bundeslandes Sachsen kofinanziert wurde. Für diese Stufe wurden neben Neuentwicklungen auch vorhandene Komponenten, wie z. B. bereits installierte Detektoren, die lediglich vernetzt werden mussten, die VBA auf der A4 oder das LSA-Betriebsüberwachungssystem, genutzt und erweitert. Zur flächendeckenden Einführung der entwickelten Funktionalitäten und dem Aufbau weiterer Systeme in der Praxis wurde anschließend ein Förderprogramm des Landes mit einer Kofinanzierung der Stadt genutzt. Dazu gab es entsprechende Beschlüsse des Stadtrates der Stadt Dresden. Für Weiterentwicklungen werden momentan auch Förderprogramme der EU mit entsprechender Eigenbeteiligung der Partner genutzt. In allen Entwicklungsstufen wurden soweit möglich, sowieso stattfindende Ausbauprojekte bzw. Infrastrukturprojekte auch für die Erweiterung der Funktionalität des VAMOS-Systems genutzt.

Hinweis

Hier abgedruckt finden Sie das erste Kapitel des Beitrags. Den kompletten Beitrag können Sie nachlesen in: Michael Sandrock und Gerd Riegelhuth (Hrsg.): Verkehrsmanagementzentralen in Kommunen – Eine vergleichende Darstellung. Springer Vieweg, 2014. S. 157-197 – ISBN: 978-3-658-04390-2.

Korrespondierender Autor: Jürgen Krimmling, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Telefon: +49 351 463-39750, E-Mail: juergen.krimmling@tu-dresden.de

Schaltzeitprognose verkehrsabhängiger Lichtsignalanlagen im Rahmen des Forschungsprojektes EFA 2014/2

Mario Krumnow, Sebastian Pape, Andreas Kretschmer, Jürgen Krimmling
Technische Universität Dresden

Dieser Beitrag wurde veröffentlicht zur Konferenz Heureka 2014, Stuttgart, 2. April 2014.

Zusammenfassung

Die Nutzung aktueller Verkehrsinformationen im Fahrzeug zur Unterstützung des Fahrers bei seiner Fahraufgabe ist Gegenstand vieler aktueller Forschungsprojekte [sim13; KOL10; TRA13]. Die Aufgaben der Car-2-Infrastructure Kommunikation (C2I) sind dabei vielfältig ausgeprägt, zum einen soll der Fahrer in sicherheitskritischen Situationen unterstützt werden, zum anderen sollen neue Komfortfunktionen ermöglicht werden. Im aktuellen Forschungsprojekt Energieeffizientes Fahren 2014 (EFA 2014), werden u. a. verschiedene Komfortfunktionen umgesetzt, welche eine Reichweitenerhöhung von Elektrofahrzeugen begünstigen. Im urbanen Raum wird der Verkehr vorrangig von Lichtsignalanlagen (LSA) beeinflusst [HBS09], somit ist hier ein erhöhtes Energieeinsparpotential durch eine effiziente Annäherung an die LSA möglich. Für eine flächenhafte Nutzung einer solchen „Ampelphasenassistenz“ wurde daher ein allgemeiner Ansatz entwickelt, welcher unterschiedliche verkehrsabhängige LSA-Steuerverfahren berücksichtigt. Dabei wird die vorhandene LSA Infrastruktur verwendet werden, ohne zusätzliche Umrüstungen oder besondere Installationen vorzunehmen. Der entwickelte und hier vorgestellte Algorithmus arbeitet sowohl hersteller- und schnittstellenunabhängig und lässt dabei eine Schaltzeitprognose für eine Vielzahl von verkehrsabhängigen LSA Steuerverfahren zu.

Schlagnworte: Schaltzeitprognose, verkehrsabhängiger Lichtsignalanlagen, LSA, EFA2014, OCIT, energieeffizientes Fahren, UMTS, GPRS

1 Motivation

Die begrenzte Reichweite von E-Fahrzeugen ist ein Katalysator für neue innovative Ideen. Im Rahmen des Forschungsprojektes EFA 2014/2 werden daher neue Fahrerassistenzfunktionen auf Basis von C2I-Technologie etabliert werden. Durch aktiven Informationsaustausch soll dem Fahrer ein möglichst energieoptimales Fahrverhalten vermittelt werden. Darunter

versteht man u. a. eine konkrete Geschwindigkeitsempfehlung bei der Annäherung an Lichtsignalanlagen. Weiterhin werden angepasste Routingstrategien untersucht, welche zu einer Reichweitenerhöhung der E-Fahrzeuge führen sollen. Das Optimierungskriterium all dieser Fahrerassistenzfunktionen ist demnach die Minimierung des Energieverbrauches.

2 Ausgangssituation

Die Lichtsignalanlagen welche in den deutschen Städten vorrangig eingesetzt werden, können über Detektoren die Verkehrsnachfrage detektieren und gezielt berücksichtigen. Diese verkehrabhängigen Steuerungen werden weitverbreitet eingesetzt und werden meist bei der Modernisierung alter Anlagen installiert. [Kae06; Kül96]

Bei einer mittleren Lebensdauer der Lichtsignalanlagen von ca. 20 Jahren, ist daher mit einer weiter steigenden Anzahl von verkehrabhängigen Anlagen zu rechnen [Von09].

Dresden hat beispielsweise einen Anteil von 99,4% verkehrabhängig gesteuerter LSA.

In Großstädten werden LSA Anlagen verstärkt in hohem Maße vernetzt um so beispielsweise die Bewegung von Verkehrsströmen gezielt zu optimieren, z. B. linienförmig in Form einer Grünen Welle. [Bol89]

Bei einer durchschnittlichen LSA-Dichte von ca. 1 LSA/1000 EW in deutschen Großstädten¹, ist eine Umrüstung sämtlicher Lichtsignalanlagen mit Kommunikationseinrichtungen ökonomisch kaum vertretbar.

Die Hersteller von Lichtsignalanlagen in Deutschland sind derzeit „überschaubar“. Durch die lange Lebensdauer von Lichtsignalanlagen benötigen neue Technologien sehr lang, bis sie flächendeckend verfügbar sind.

3 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 die lange Prognose von über 180 Sekunden in die Zukunft. Hierbei ist anzumerken, dass zuverlässige Prognosen bei verkehrabhängigen Steuerungen, selbst bei Vorhandensein aller Eingangsgrößen eine große Herausforderung darstellt [KOL10; KOL11].

Das entsprechende Verfahren erfüllt daher folgende Anforderungen:

- Herstellerunabhängigkeit
- Schnittstellenunabhängigkeit
- Robustheit

¹ Dresden: ca. 500.000 EW besitzt 470 LSA

- Erweiterbarkeit

Um ein Höchstmaß an Lichtsignalanlagen unterstützen zu können und um unabhängig von Planungsunterlagen zu sein, benutzt die Schaltzeitprognose nur die resultierenden Schaltdaten der Signalgruppen. In Abbildung 1 ist die Einordnung einer solchen Schaltzeitprognose schematisch dargestellt.

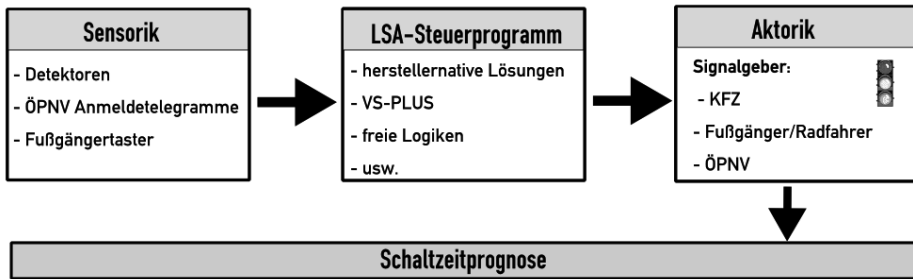


Abbildung 1: Das Verfahren nutzt nur die reinen Schaltinformationen der Signalgeber.

4 Klassifikation von LSA-Steuerungsverfahren

Die Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) unterscheiden bei den Steuerungsverfahren grundsätzlich in zwei Ebenen. [LSA10] 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 zum anderen 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, Signalprogrammabbildung).

5 Einschränkungen der zu entwickelnden Schaltzeitprognose

In Tabelle 1 wird bereits eine Einschränkung verschiedener Steuerverfahren nach RiLSA vorgenommen, welche sich an den zu erwartenden Freiheitsgrad richten. [Kru12]

6 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.

Tabelle 1: Grundsätzliche Eignung der LSA-Steuerverfahren für Prognosen größer 180 s.

Makroskopische Steuerverfahren		Prognose möglich
Signalprogrammauswahl	Zeitplanabhängige Auswahl der Signalprogramme Verkehrsabhängige Auswahl der Signalprogramme	Ja
Bildung Rahmensignalprogramme	Verkehrsabhängige Bildung der Signalprogramme	Bedingt/Nein
Mikroskopische Steuerverfahren		Prognose möglich
Festzeitsignalprogramm		Ja
Signalprogrammanpassung	Freigabezeit Anpassung Phasentausch Phasenforderung Versatzzeit Anpassung	Ja/Bedingt
Signalprogrammbildung	Frei Veränderbarkeit	Bedingt/Nein

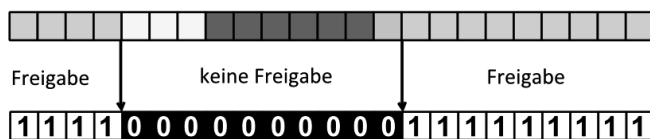


Abbildung 2: Überführung der Signalzustände in Vektoren mit binärer Interpretation.

Der Signalzustand der später im Fahrzeug ausgewertet werden soll (probability to go), soll eine Aussage darüber geben, ob gefahren werden kann 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 und den Zuständen mit Freigabe eine „1“. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 2 beispielhaft dargestellt.

Das Zerlegen der LSA Schaltdaten in Binärvektoren führt zu einer Reduzierung der Signalzustände. Am Beispiel einer verkehrsabhängigen Steuerung in Abbildung 3 ist zu sehen, dass die vier Schaltzustände einer KFZ Signalgruppe analog des Beispiels in Abbildung 3 für alle Umläufe in Binärvektoren überführt werden können.

In Abbildung 4 konnte bereits die vom Steuergerät gesendete Umlaufsekunde genutzt werden, um die Umläufe klar voneinander zu unterscheiden.

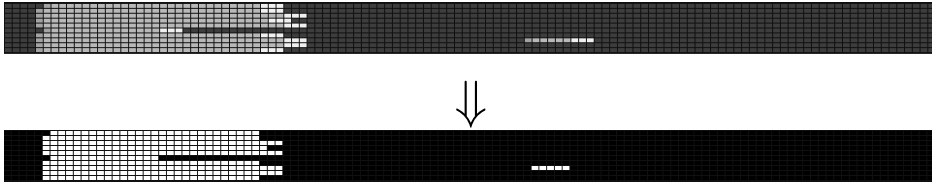


Abbildung 3: Überführung der Signalzustände in Vektoren mit binärer Interpretation.

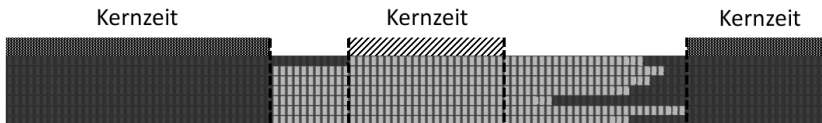


Abbildung 4: Darstellung von Kernzeiten.

Eine Prognose über einen längeren Zeitraum hinweg (> 180 s) impliziert entweder eine sehr gute Kenntnisse über das konkrete Steuerverfahren inklusive sämtlicher eintretender Detektordaten bzw. 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 4). Andere Forschungsprojekte haben dazu bewusst verkehrsabhängige Steuerungen für einen definierten Zeitbereich z. B. 15 Minuten mit statischen Signalzuständen versorgt, um dieses Kriterium zu erfüllen [Ble11].

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 Umlaufsekunde 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].

7 Autokorrelationsanalyse von LSA-Steuerverfahren

Der Verlauf von LSA-Schaltdaten, kann als zeitdiskreter Prozess betrachtet werden. Die Kovarianz solcher stochastischer Prozesse (Verteilung der Freigabezeiten) kann dabei mithilfe der Autovarianzfunktion beschrieben werden. [Sch01]

Autovarianz:

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

Für die Erkennung von periodischen Mustern, welche sich zwangsläufig bei umlaufbasierten Steuerverfahren einstellen, kann eine Autokorrelationsfunktion wichtige Aussagen liefern.

Autokorrelationsfunktion:

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

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 Eingangssignal, 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 im 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 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.

8 Festzeitsteuerungen

Die Korrelationskoeffizienten für den Dresdener Knotenpunkt Columbusstr./Wernerstr. in Abbildung 5 zeigt 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 ersichtlich aus den weiteren lokalen Maxima bei 120s und 180s, welches ein Vielfaches von der prognostizierten Umlaufdauer entspricht.

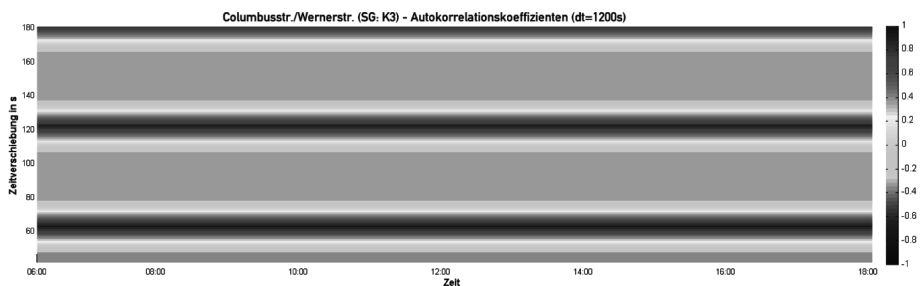


Abbildung 5: Autokorrelationskoeffizienten für den Zeitraum 25.02.2013 – 6 bis 18 Uhr.

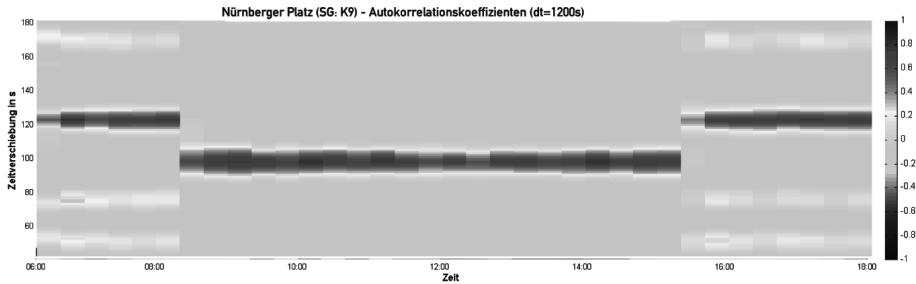


Abbildung 6: Autokorrelationskoeffizienten für den Zeitraum 25.02.2013 – 06 bis 18 Uhr

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

⇒ Hervorragende Prognostizierbarkeit derartiger Signalverläufe ist zu erwarten

9 Teilverkehrsabhängige Steuerungen

Am Dresdener Knotenpunkt Nürnberger Platz läuft derzeit eine verkehrsabhängige Steuerung auf Basis des Steuerverfahrens VS-Plus², mit sehr hoher 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 nach 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.

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

⇒ Eine Schaltzeitprognose (> 180 s) ist sinnvoll

10 Vollverkehrsabhängige Steuerungen

In Abbildung 7 sind die Autokorrelationskoeffizienten für den Dresdener Knotenpunkt Wasa- platz dargestellt. Im Vergleich zu den zuvor dargestellten Steuerungen, handelt es sich bei

² Herstellerunabhängiges Steuerungsverfahren

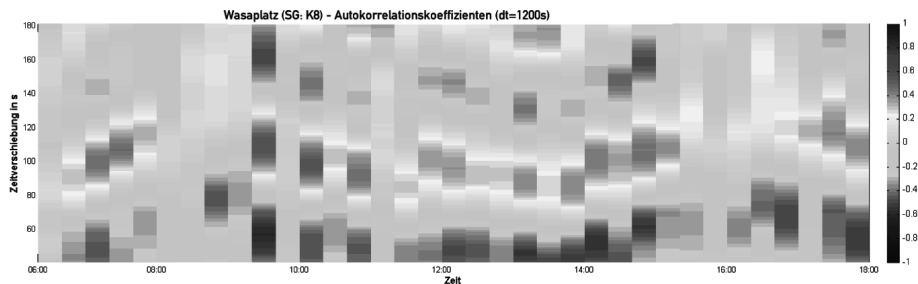


Abbildung 7: Autokorrelationskoeffizienten für den Zeitraum 25.02.2013 – 06 bis 18 Uhr

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 Korrelationskoeffizienten deutlich dargestellt, so kann ein eindeutiges Maximum nicht erkannt werden. Auch ändert sich die geschätzte Umlaufdauer für jeden einzelnen Zeitbereich.

⇒ Schaltzeitprognosen (> 180 s) sind ohne zusätzliche Informationen kaum möglich

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.

11 Umsetzung

Es wurde ein Algorithmus für die Schaltzeitprognose entwickelt der 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 in welcher Umlaufsekunde der Zustand der Freigabe vorhanden war um daraus die Wahrscheinlichkeiten zu berechnen. Dadurch lässt sich die Steuerungsart ermitteln und die dazugehörigen Parameter wie Kernzeiten, Mindestgrünzeit oder Maximalgrünzeit. Für jede Signalgruppe und für jedes Programm wird solch ein Basisvektor erstellt. [Pap10]

Für die eigentliche Prognose wird dieser Basisvektor zu Grunde gelegt und mit Hilfe aktueller Daten optimiert. Ein 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 wer-

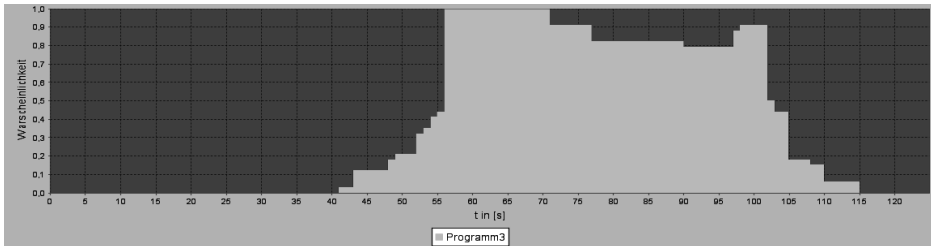


Abbildung 8: Basisvektor Signalgruppe K1/K2 KP Nürnberger Platz in Dresden (Programm 3)

den kann, verringert werden. Prognosen können somit über mehrere Minuten oder sogar Stunden erstellt werden, nimmt man als Referenz 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 zum 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]

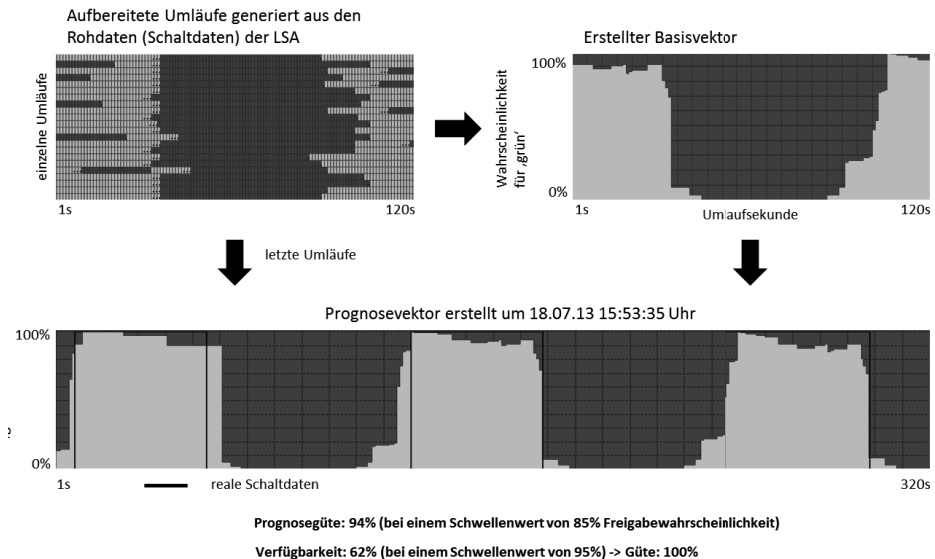


Abbildung 9: K1/K2 LSA 133, Programm 3 (Spitzenprogramm)

Anschließend wird jeder Prognosevektor mit den realen Schaltdaten verglichen und eine Güte für die Genauigkeit des Prognosevektors ermittelt. Dabei wird durch ein Schwellen-

wert 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 ihren Wahrscheinlichkeiten über oder unter einen angegebenen Schwellenwert liegen (z. B. über 95 % und unter 5 %). Je größer die Verfügbarkeit, desto kleiner der Rahmen in dem die Prognose nicht genau bestimmt werden kann.

Der Prognosealgorithmus wurde als Softwaredienst ausgebildet, welcher permanent Schaltzeitprognosen liefern kann.

12 Ergebnisse

Der entwickelte Algorithmus ist bereits seit einigen Monaten im Einsatz und liefert derzeit online Schaltzeitprognosen für über 180 Lichtsignalanlagen in Dresden. In Abbildung 10 sind die derzeit verfügbaren LSA mit Schaltzeitprognose schematisch dargestellt.



Abbildung 10: Orange: LSA mit Prognose (ca. 180), Schwarz: LSA ohne Prognose (ca. 290)

Derzeit finden zu einem verschiedene Validierungen der Prognosedaten offline durch Vergleich der prognostizierten Daten mit den tatsächlich eingetretenen Schaltzuständen statt.

Zum anderen finden 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 11 und 12 wird der Einsatz der Schaltzeitprognose, am Beispiel des Nürnberger Platzes in Dresden, dargestellt.

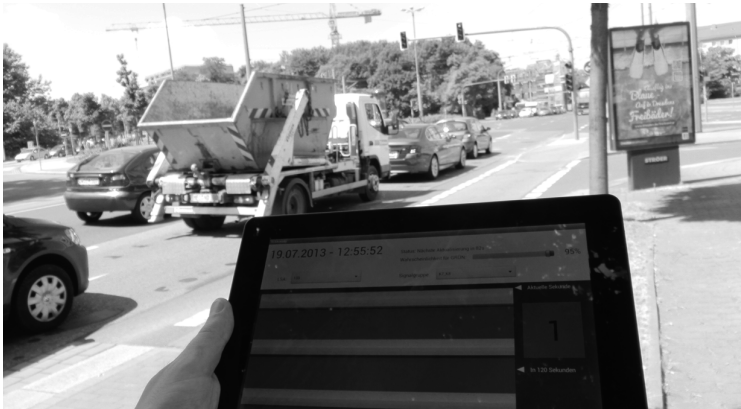


Abbildung 11: Schaltzeitprognose als mobile „App“ für Tablet und Smartphone (GPRS/UMTS)



Abbildung 12: Schaltzeitprognose auf Basis von Wahrscheinlichkeitsvektoren

13 Ausblick

Verschiedene Aspekte und sinnvolle Erweiterungen des aktuellen Ansatzes werden im Full-paper diskutiert, speziell wird auch auf verbesserte Prognosegüten bei kurzen Prognosehorizonten eingegangen.

Literaturverzeichnis

- [Ble11] O. BLEY, R. KUTZNER, B. FRIEDRICH, F. SAUST, J. M. WILLE, M. MAURER, W. NIEBEL, S. NAUMANN, F. WOLF, T. SCHÜLER, K. BOGENBERGER, M. JUNGE und J. LANGENBERG: „Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung“. In: *AAET 2011 Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig, 9.–11. Feb. 2011.
- [Bol89] M. BOLTZE: „Optimierung von Umlaufzeiten in der Lichtsignalsteuerung für Straßennetze“. In: *Straßenverkehrstechnik* 33 (6 1989), Seiten 203–207.
- [HBS09] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN, Herausgeber: *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: HBS*. Köln: FGSV-Verlag, 2009.
- [Kae06] H. KAEMMERER, J. SCHÖNLEITER und W. WIRTH: „Der Siegeszug der Ampel: 75 Jahre Verkehrsregelung in deutschen Grossstädten : Düsseldorf, Berlin“. In: *Archiv für die Geschichte des Straßen- und Verkehrswesen*. Köln: FGSV-Verlag, 2006.
- [KOL10] *Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen*. 2010. URL: www.projekt-koline.de (besucht am 24. 07. 2013).
- [KOL11] *Kooperative Lichtsignaloptimierung*. 2011. URL: www.kolibri-projekt.de (besucht am 24. 07. 2013).
- [Kru12] M. KRUMNOW: „Schaltzeitprognose verkehrsadaptiver Lichtsignalanlagen im Rahmen des Forschungsprojektes EFA 2014/2“. In: 8. VIMOS-Tagung. Dresden: Kompetenzzentrum für operatives Verkehrsmanagement VIMOS, 29. Nov. 2012.
- [Kru13] M. KRUMNOW: „Die Ampeln der Stadt verkehrabhängig steuern“. In: *Dresdner Universitätsjournal* (26. März 2013).
- [Kül96] B. KÜLZER: „Untersuchungen zum Alterungsprozess von Lichtsignalprogrammen“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 1996.
- [LSA10] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN, Herausgeber: *Richtlinien für Lichtsignalanlagen: RiLSA*. Köln: FGSV-Verlag, 2010.
- [Pap10] S. PAPE: „Untersuchungen zur Rekonstruktion von LSA Signalprogrammen unter Nutzung von Datensätzen des Sipl.-Online-Datenstrome“. Studienarbeit. Dresden: Technische Universität Dresden, 2010.
- [Pap12] S. PAPE: „Untersuchung und Umsetzung eines Verfahrens zur Prädiktion von Freigabezeiten an verkehrabhängig gesteuerten Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung des eingesetzten Steuerungsverfahrens und der möglichen ÖPNV Beeinflussung“. Diplomarbeit. Dresden: Technische Universität Dresden, 2012.
- [Sch01] R. SCHLITGEN: *Angewandte Zeitreihenanalyse*. Oldenburg: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2001.

- [sim13] *Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland*. SIMTD. 2013. URL: www.simtd.de (besucht am 24.07.2013).
- [TRA13] *TRAVOLUTION in Ingolstadt*. SYSTEMENTWICKLUNG UND VERKEHRSINFORMATIK GMBH. 2013. URL: www.travolution-ingolstadt.de (besucht am 24.07.2013).
- [Von09] J. VON MÖRNER, A. LEUPOLD und A. VESPER: *Befragung zum Betrieb von Lichtsignalanlagen und deren Steuerung in innerstädtischen Straßennetzen*. Aachen: Shaker, 2009.

Korrespondierender Autor: Mario Krumnow, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Telefon: +49 351 463-36780, E-Mail: mario.krumnow@tu-dresden.de

Analyse eines LSA-Assistenzsystems mittels nanoskopischer Simulation in komplexen Verkehrsszenarien

Torsten Schubert, Mario Krumnow, Stephan Uebel, Bernard Bäker, Jürgen Krimmling
Technische Universität Dresden

Dieser Beitrag wurde veröffentlicht in: DLR e. V.: AAET 2014 – Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig, 12.–13. Februar 2014, ITS Niedersachsen, ISBN: 393-765-531-X.

Zusammenfassung

Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsprojekte setzen sich derzeit das Ziel, Technologien für energieeffizientere Fahrzeugantriebe, intelligente Fahrerassistenzsysteme sowie das hochautomatisierte Fahren weiter voranzubringen. Diesen fahrzeugindividuellen Systemen gegenüber stehen stationäre verkehrsadaptive Einrichtungen, wie zum Beispiel Lichtsignalanlagen (LSA). Die Wechselwirkungen dieser unterschiedlichen Systeme sind vor der praktischen Umsetzung zunächst durch geeignete Modelle zu analysieren.

Diese Veröffentlichung beschäftigt sich mit der Verknüpfung einer fahrzeugindividuellen Simulation (nanoskopisch) mit einer Verkehrsflusssimulation (mikro- bzw. makroskopisch). Dabei kommt als nanoskopische Fahrzeugsimulation ein MathWorks® MATLAB Modell zum Einsatz, welches über eine Softwareschnittstelle mit der Verkehrsflusssimulation SUMO (Simulation of Urban Mobility) interagiert. Zur Verdeutlichung der dadurch gewonnenen Potentiale, wird zunächst ein LSA-Assistenzsystem vorgestellt, welches in komplexen Verkehrsszenarien mit Hilfe dieser Simulationsumgebung evaluiert und erprobt wird. Somit können die Einflüsse verschiedener Verkehrsszenarien auf den Energieverbrauch des Einzelfahrzeugs, die infolge anderer Verkehrsteilnehmer und komplexer Zusammenhänge in einem Verkehrsnetz bestehen, realistisch modelliert werden. Mit Hilfe dieser geschaffenen Softwareumgebung lassen sich verschiedenste Parameter der einzelnen Fahrzeuge oder der Verkehrsinfrastruktur variieren.

1 Einleitung

Die zunehmende Urbanisierung und die damit einhergehende höhere Verkehrsnachfrage in Städten führen zu einer Erhöhung der lokalen Emissionen und zu höherer Auslastung der

Verkehrswege. Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsprojekte setzen sich derzeit das Ziel, Technologien für energieeffizientere Fahrzeugantriebe, intelligente Fahrerassistenzsysteme sowie das hochautomatisierte Fahren weiter voranzubringen. Diesen fahrzeugindividuellen Systemen gegenüber stehen stationäre verkehrsadaptive Einrichtungen, wie zum Beispiel Lichtsignalanlagen (LSA), die den gesamten Verkehr effizient regeln. Die Auswirkungen dieser unterschiedlichen Systeme und deren Wechselwirkungen sind vor der praktischen Umsetzung zunächst durch geeignete Modelle zu analysieren.

Untersuchungen in [Ble11], [Sch10] und [Sch11] zum Thema Traffic Light Assistance Systems (TLAS) und Predictive Cruise Control Systems (PCCS) [Asa11] zeigen, dass derartige Fahrerassistenzsysteme (FAS) ein hohes Potential besitzen um einem einzelnen Fahrzeug eine energieeffizientere Fahrweise zu ermöglichen. Alle Systeme ziehen Informationen der Lichtsignalanlagen (LSA) in die Berechnung einer Annäherungsgeschwindigkeit ein. Dabei werden deutliche Ersparnisse von 3-5 % [Ble11] und in bestimmten Situationen mitunter bis zu 30 % [Sch11] im Vergleich zum uninformierten Fahrzeug nachgewiesen.

Untersuchungen, welche zusätzlich noch den Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer (Rückstau) berücksichtigen, beschränken sich hingegen auf stark vereinfachte Verkehrsszenarien. Beispielsweise werden nur einzelne Kreuzungsabschnitte teilweise nur mit einer einzelnen Fahrspur untersucht. [Ble11; Sch10; Sch11]

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Energieeffizientes Fahren 2014 Phase 2 – Reichweitenerhöhung von Elektrofahrzeugen“ (EFA 2014/2) wurde eine reale Fahrzeugroute im lokalen Stadtverkehr modelliert um Wechselwirkungen auf ein LSA-Assistenzsystem zu untersuchen. Zur Energieverbrauchsberechnung dient ein Modell eines Elektrofahrzeuges in MATLAB/Simulink. Verschiedene Verkehrsszenarien werden mit diesem Beispiel gezielt untersucht und deren Einfluss auf den Energiebedarf diskutiert. Es wird deutlich, dass unter bestimmten Voraussetzungen ein Einsparpotential besteht. Die gewonnen Erkenntnisse sollen Aufschluss darüber geben, wann derartige Systeme und deren Einsatz sinnvoll sind und welches Potential sie tatsächlich besitzen.

Im Folgenden wird die Kopplung einer Verkehrsflusssimulation mit Fahrzeugmodellen in MATLAB Simulink vorgestellt, welche umfassendere Analysen von TLAS ermöglicht. Anhand eines Beispielszenarios werden die Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Verkehr in verschiedene Situationen simuliert und die Ergebnisse diskutiert.

2 Gekoppelte Fahrzeug- und Verkehrsflusssimulation

Als Werkzeug zur Verkehrsflusssimulation wurde SUMO (Simulation of Urban Mobility) [Kra12] genutzt, das mit einer I/O-Schnittstelle versehen ist. Diese wurde in MATLAB integriert und um Funktionen zur Gewinnung streckenbezogener Daten erweitert. Anhand des Fahrzeugmodells eines E-Fahrzeugs wird schließlich eine energieflussbasierte Bewertung der untersuchten FAS durchgeführt.

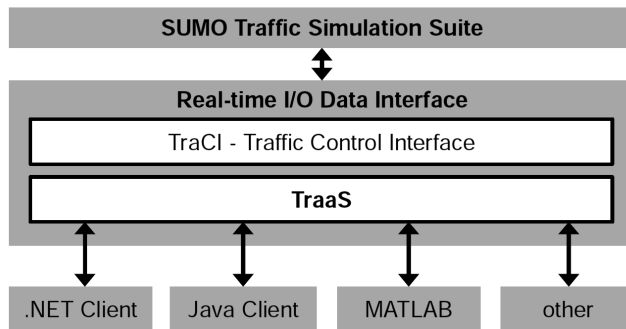


Abbildung 1: Kommunikation von externen Programmen mit SUMO.

2.1 Verkehrsflusssimulation mittels SUMO

Im Bereich der Verkehrsmikrosimulationen gibt es zahlreiche Softwareapplikationen, welche die bekannten Fahrzeugfolgemodelle wie z. B. Wiedemann, Krauß oder IDM [Kra12] 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 [Kra12] 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]

2.2 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.

2.3 Integration der TraaS-Library in MATLAB

Die beschriebene TraaS Schnittstelle wurde in MATLAB integriert um die entsprechenden JAVA-Methoden zur Steuerung der Simulation und Abfrage von Simulationsdaten nutzen zu

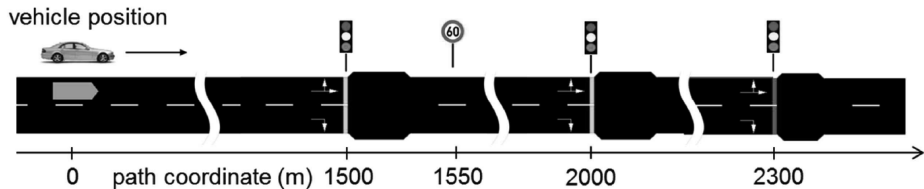


Abbildung 2: Elektronischer SUMO-Horizont nach [Res05]

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.

2.4 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 2 dargestellt.

In Anlehnung an das ADASIS Protokoll [Res05] werden diese dem TLAS in Form eines Elektronischen Horizonts zur Verfügung gestellt.

2.5 Integration eines E-Fahrzeug-Modells

Zur Bewertung des TLAS können verschiedene Kenngrößen genutzt werden. Im energetischen Sinne sind hier Aussagen über den Energieverbrauch erwünscht. Daher wurde für diese Untersuchung ein Elektrofahrzeugmodell in Matlab/Simulink erstellt.

Basis des Modells ist der BMW E82e, der im Rahmen des Projekt EFA 2014/2 als Versuchsträger zur Verfügung steht. Es handelt sich um den Umbau eines BMW 1er Coupés (E82) zu einem reinen Elektrofahrzeug. Der Elektromotor treibt die Hinterachse mit einer Leistung von 125 kW an und ermöglicht es mit einer Batterieladung von maximal 32 kWh bis zu 160 km weit zu fahren. Beim erstellten Modell handelt es sich um ein kausales vorwärts gerichtetes Modell. Die Struktur des Modells ist in Abbildung 3 dargestellt.

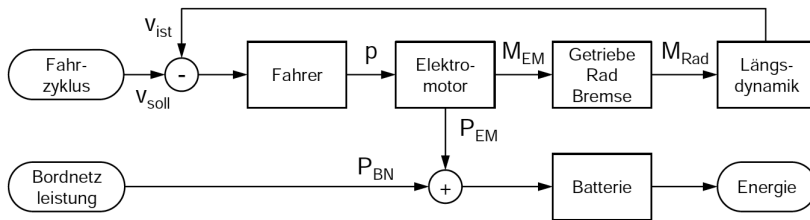


Abbildung 3: Schematische Darstellung des verwendeten Elektrofahrzeugmodells

Die Eingangsgröße ist das in SUMO simulierte Fahrprofil, das eine zeitabhängige Soll-Geschwindigkeit v_{soll} vorgibt. Das Modell des Fahrers besteht aus einem PI-Regler mit Anti-Windup. Es erhält als Eingang die Differenz von der Soll-Geschwindigkeit und der Ist-Geschwindigkeit v_{ist} und berechnet daraus einen Pedalwert p , der Eingangsgröße des Elektromotormodells ist. Dieser berechnet die nötige elektrische Leistung P_{EM} , um das Getriebeeingangsmoment M_{KW} zu stellen. Der Elektromotor kann im 4-Quadrantenbetrieb arbeiten, d. h. bis zum Erreichen der Schlupfgrenze an der Hinterachse ist Rekuperation möglich. Das Getriebeeingangsmoment wird durch Rad und Getriebe auf das Radmoment M_{Rad} übersetzt, welches in die Fahrwiderstandsgleichung eingeht. Mit dieser lässt sich die Ist-Geschwindigkeit durch das Längsdynamikmodell berechnen.

Als zweite Eingangsgröße kann eine Bordnetzlast P_{BN} vorgegeben werden. Die Summe aus Bordnetzlast und Leistung der E-Maschine bildet den Eingang des Batteriemodells. In diesem ist ein Ersatzschaltbild mit einer idealen Spannungsquelle und einem Innenwiderstand zur Berechnung der Batterieverlustleistung modelliert. Die Ausgabe des Modells ist die Änderung der in der Batterie gespeicherten Energie. Diese Energieänderung ist Basis der Verbrauchsanalysen.

3 Implementierung des LSA-Assistenzsystems

Einen Einblick in die Möglichkeiten der vorgestellten Simulationsumgebung gibt das folgende Kapitel anhand der Analyse eines LSA-Assistenzsystems. Als Grundlage dienen Erkenntnisse aus [Asa11; Ble11; Sch10; Sch11]. Für die Untersuchung wird ein Beispielszenario genutzt was aus der Realität abgeleitet ist.

Anhand des SUMO-Horizonts (siehe Abbildung 2) ermittelt das TLAS eine Annäherungsgeschwindigkeit an die nächste LSA damit das Fahrzeug diese möglichst ohne Halt bei grün passieren kann. Dafür wird der in [Asa11] beschriebene Ansatz genutzt. Als Eingangsgröße dienen die Zeitintervalle für die Grün-/Rotphasen tt_{gi} bzw. tt_{ri} und die Entfernungen d zur LSA.

$$tt_{gi} = [tt_{g1}, tt_{g2}, \dots, tt_{gn}] \quad (1)$$

$$tt_{ri} = [tt_{r1}, tt_{r2}, \dots, tt_{rn}] \quad (2)$$

Daraus 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.

$$[v_{min}, v_{max}] \cap \left[\frac{d}{tt_{ri}}, \frac{d}{tt_{gi}} \right] \quad (3)$$

Der ermittelte Rückstau wird bei der Berechnung der Annäherungsgeschwindigkeit in Form einer effektiven Freigabezeit und einer virtuellen Haltelinie berücksichtigt [Sch10; Sch11]. Für die Geschwindigkeitsintervalle ergibt sich somit folgender Zusammenhang:

$$[v_{min}, v_{max}] \cap \left[\frac{d}{tt_{ri}}, \frac{d+q}{tt_{gi} + tt_{qi}} \right] \quad (4)$$

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

4 Analyse in komplexen Verkehrsszenarien

Im Fokus der Betrachtung steht das Einsparpotentials für ein einzelnes Fahrzeug. Primär gilt es herauszufinden, wie häufig Situationen, die einen Stillstand verursachen auftreten und welche Auswirkungen eine Strategie zur Vermeidung dieser Stillstände auf den Fahrverlauf haben kann. Anhand einer Beispielstrecke werden verschiedene Verkehrsszenarien analysiert.

4.1 Vorstellung der abstrahierten Beispielstrecke

Im Rahmen des Forschungsprojektes EFA 2014/2 steht eine Teststrecke im Stadtgebiet von Dresden zur Verfügung. Für diese sind die Infrastrukturinformationen der LSA verfügbar. Mit Hilfe eines eigens entwickelten Netzeditors wurde ein Teil dieser Teststrecke nachgebildet. Als Grundlage dienen Daten von Open Street Map (OSM). Zur Komplexitätsbeherrschung bei der Parametrierung der Strecke mit Verkehrsdaten wurden folgende Vereinfachungen vorgenommen:

- Geschwindigkeit auf der Strecke ist auf 60 km/h begrenzt

- Vernachlässigung der Streckengeometrie (Kurven, u. a.)
- alle Streckensegmente sind zweispurig
- Parametrierung der Beispielstrecke mit aufgezeichneten Daten der LSA aus Verkehrszentrale

4.2 Simulation und Diskussion der ermittelten Ergebnisse

Neben der Anzahl der Fahrzeughalte und der Ankunftszeit ist vor allem der Energieverbrauch des Elektrofahrzeugs relevant. Dieser wird über das in Abschnitt 2.5 vorgestellte Modell ermittelt.

Das Fahrzeug wird mit und ohne Assistenzfunktion zu verschiedenen Eintrittszeitpunkten im Verkehrsnetz simuliert. Insgesamt wurden 100 Eintrittszeitpunkte untersucht. Mittels des automatisch generierten Ort-Zeit-Diagramms (siehe Abbildung 4) können alle relevanten Fahrtrajektorien dargestellt und detailliert der Geschwindigkeitsverlauf und der Energieverbrauch des betrachteten Fahrzeuges analysiert werden. Zudem werden zusätzliche Aussagen über Anzahl der Fahrzeugstillstände und die Differenz der Reisezeit in einem zusätzlichen Diagramm Abbildung 5 visualisiert.

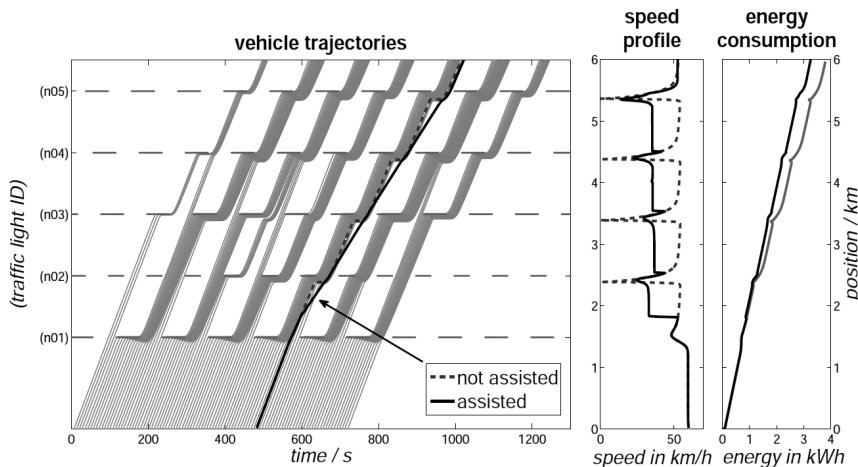


Abbildung 4: Links: Verschiedene Eintrittszeitpunkte für das Fahrzeug in den Verkehr. Verkehrsstärke ist konstant bei 500 Fzg/h. Hervorgehoben ist Fahrzeug Nr. 67. Rechts: Geschwindigkeitsprofil und Energieverbrauch im Vergleich zum nicht assistierten Fahrzeug.

In Abbildung 4 ist die Trajektorie Nr. 67 hervorgehoben. Das nicht assistierte Fahrzeug kommt an 4 der 5 Kreuzungen zum Stillstand. Bei aktiviertem TLAS können alle diese Fahrzeugstillstände erfolgreich verhindert werden. Dies führt zu einer Energieeinsparung von 18,4%. Zu beachten ist jedoch, dass diese Konstellation bei den 100 untersuchten Fahrzeugen genau einmal in dieser Art und Weise vorzufinden ist. Wichtig ist daher, dass man Aussagen

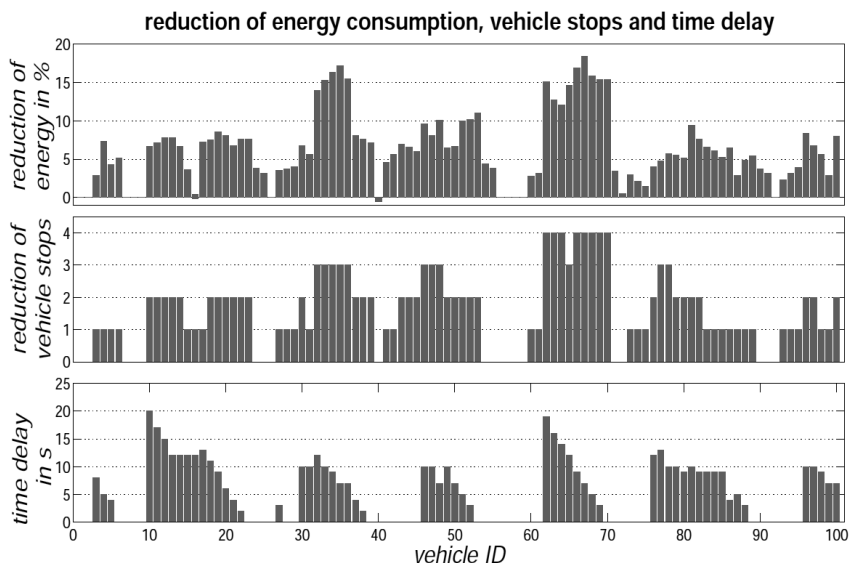


Abbildung 5: Oben: deutliches Einsparpotential von bis zu 18,4% für Fahrzeug Nr. 67. Durchschnittliches Potential bei 6,3% für die Reduktion des Energieverbrauchs. Unten: Verringerung von teilweise bis zu 4 Stillständen.

darüber treffen kann, wie häufig bestimmte Situationen im Straßenverkehr durchschnittlich auftreten. Dazu dient Abbildung 5. Hier werden alle möglichen Konstellationen betrachtet, die das Fahrzeug in Abhängigkeit verschiedener Eintrittszeitpunkte in das Netz durchlaufen kann. Im Mittel kann 6,3% Energie in diesem Streckenabschnitt eingespart werden.

In einem Verkehrsnetz kann abhängig von der Tageszeit ein stark schwankendes Verkehrsaufkommen vorhanden sein. Für diese Untersuchung wurde daher die Verkehrsstärke auf dem Streckenabschnitt variiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Vergleich Fahrzeug mit/ohne TLAS in Hinblick auf durchschnittliche Energieeinsparung, Summe der Fahrzeugstillstände und die Anzahl der verhinderten Stillstände sowie die Reisezeitdifferenz in Abhängigkeit der Verkehrsdichte.

Verkehrsdichte	Ø Energieeinsparung	Fahrzeugstillstände			Reisezeitdifferenz in s	
		kein TLAS	reduziert abs.	Ø	max.	Ø
400 Fzg/h	5,22%	376	142	37,8	17	4,19
450 Fzg/h	5,23%	385	137	35,6	16	4,03
500 Fzg/h	5,46%	392	157	40,1	23	5,78
550 Fzg/h	5,60%	405	160	39,5	21	5,83
600 Fzg/h	5,60%	415	161	38,8	74	6,78

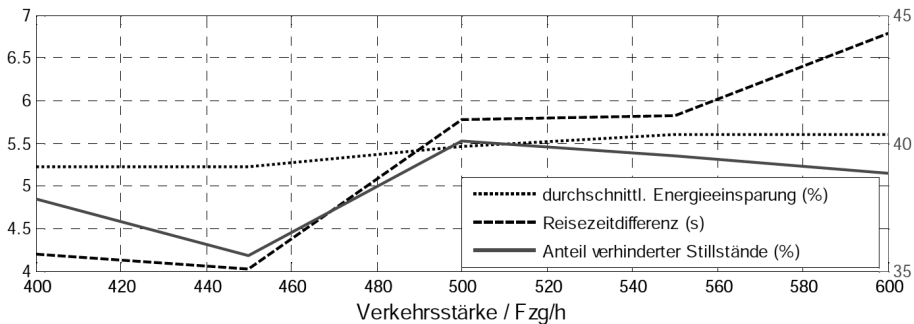


Abbildung 6: Durchschnittliches Einsparpotential, Reisezeitdifferenz und Anteil verhinderter Stillstände in Abhängigkeit der Verkehrsstärke.

Es wird deutlich, dass im vorgestellten Beispiel mit zunehmender Verkehrsstärke das durchschnittliche Einsparpotential steigt. Was darauf zurückzuführen ist, dass der Anteil der möglichen Fahrzeugstillstände, die verhindert werden können, zunimmt (Tabelle 1).

Demgegenüber steht eine leichte Zunahme der durchschnittlichen Reisezeitdifferenz. Zudem treten vereinzelt ungünstige Situationen auf, in denen das Assistenzsystem den Stillstand an der ersten LSA verhindern kann. Der Stillstand an der nächsten LSA ist jedoch nicht vermeidbar. Dies führt mitunter dazu, dass dieses Fahrzeug erst deutlich später das Ende der Strecke erreicht. Aufgrund der zeitlich konstanten Bordnetzlast der Nebenverbraucher, verringert sich das erreichbare Einsparpotential mit zunehmender Reisezeitdifferenz.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Arbeit beschreibt einen Ansatz einer neuen Simulationsumgebung zur Analyse von FAS in komplexen Verkehrsszenarien. Es wurden in MATLAB entwickelte TLAS und Fahrzeugmodelle mit der Verkehrssimulation SUMO gekoppelt. Dadurch besteht die Möglichkeit verschiedene effizienzsteigernde Assistenzsysteme in einer Verkehrsumgebung zu analysieren und den Einfluss unterschiedlicher Störeinflüsse gezielt zu untersuchen. Anhand eines Beispielszenarios konnten Simulationen durchgeführt und erste exemplarische Ergebnisse vorgestellt werden.

Für künftige Untersuchungen ist u. a. geplant, verschiedene Ausstattungsdaten der Assistenzfunktionen und variierende Verteilungen dieser zu untersuchen. Weiterhin sollen verschiedene Fahrzeug- und Fahrertypen systematisch analysiert werden, um individuelle Potentiale aufzuzeigen.

Bei der Kalibrierung des Streckenmodells existieren derzeit noch einige Herausforderungen. Anhand realer Schalt- und Verkehrsdaten wird eine Verbesserung der Genauigkeit der Verkehrsumgebung angestrebt. Dabei sollen auch verkehradaptive LSA und die sich ergebenden Unsicherheiten bei der Vorhersage der Schaltzeiten und des Rückstaus betrachtet werden.

Literaturverzeichnis

- [Asa11] B. ASADI und A. VAHIDI: „Predictive Cruise Control: Utilizing Upcoming Traffic Signal Information for Improving Fuel Economy and Reducing Trip Time“. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 19.3 (2011), Seiten 707–714. DOI: 10.1109/TCST.2010.2047860.
- [Ble11] O. BLEY, R. KUTZNER, B. FRIEDRICH, F. SAUST, J. M. WILLE, M. MAURER, W. NIEBEL, S. NAUMANN, F. WOLF, T. SCHÜLER, K. BOGENBERGER, M. JUNGE und J. LANGENBERG: „Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung“. In: *AAET 2011 Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig, 9.–11. Feb. 2011.
- [Kra12] D. KRAJZEWICZ, J. ERDMANN, M. BEHRISCH und L. BIEKER: „Recent development and applications of SUMO–simulation of urban mobility“. In: *International Journal On Advances in Systems and Measurements* 5.3-4 (2012), Seiten 128–138.
- [Kru13a] M. KRUMNOW: „Sumo as a Service – Building up a Web Service to Interact with SUMO“. In: *Reports of the DLR-Institute of Transportation Systems*. Band 21. Berlin: Springer, 15.–17. Mai 2013.
- [Kru13b] M. KRUMNOW: „Verkehrsmikrosimulation mit Echtzeitdaten – Herausforderungen und Chancen“. In: 9. VIMOS-Tagung. Dresden: Kompetenzzentrum für operatives Verkehrsmanagement VIMOS, 4. Dez. 2013.
- [Res05] C. RESS, D. BALZER, A. BRACHT, S. DUREKOVIC und J. LÖWENAU: *ADASIS Protocol for advanced in-vehicle applications*. 2005.
- [Sch10] T. SCHUBERT: „Entwurf und Evaluierung einer prädiktiven Fahrstrategie auf Basis von Ampel-Fahrzeug-Kommunikationsdaten“. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, 2010.
- [Sch11] P. SCHURICHT, O. MICHLER und B. BAKER: „Efficiency-increasing driver assistance at signalized intersections using predictive traffic state estimation“. In: *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 5.–7. Okt. 2011, Seiten 347–352. DOI: 10.1109/ITSC.2011.6083111.
- [Sch13] T. SCHUBERT, M. KRUMNOW, B. BÄKER und J. KRIMMLING: „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*. Herausgegeben von T. ALBRECHT, B. JAEKEL und M. LEHNERT. Dresden: TUDpress, 2013, Seiten 333–343. ISBN: 978-3-944331-34-8.

Korrespondierender Autor: Mario Krumnow, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Telefon: +49 351 463-36780, E-Mail: mario.krumnow@tu-dresden.de

Using Online Data from Local Traffic Management Centers to Assist an Energy-Efficient Driving Behavior

Mario Krumnow, Robert Richter, Per Lewerenz, Torsten Schubert, Stephan Uebel
Technische Universität Dresden

The paper was published in B. Bäker and L. Morawietz (Hrsg.): Energy Efficient Vehicles 2014, TUDpress, Dresden, 2014, ISBN: 978-3-944331-65-2.

Abstract

The main goals of today's research and development are leading to different systems and topics for more energy-efficient technologies in powertrains and intelligent driver assistance systems. The funded project "Energieeffizientes Fahren 2014" (EFA 2014/2) aims for an increasing range of electric vehicles. In order to reach this goal an approach has been chosen which includes infrastructure data using Vehicle-to-Infrastructure (V2I) communication technologies. Particularly traffic actuated traffic lights are being utilized since these are state of the art to optimize traffic flows. Based on the interaction between vehicle and infrastructure the driver will be able to adapt an energy-efficient manner of driving easily through additional information and integrated board aggregation. This approach has been successfully tested in Dresden.

Keywords: Traffic Management, Communication, GPS, UMTS, DATEX II, Energy efficient, Microscopic Traffic Simulation, Dresden

1 Motivation

Traffic demand is increasing constantly and with it emission density which leads to more and more environmental pollution. In order to reduce arising emissions due to road traffic electric vehicles are being introduced. The disadvantage of these vehicles is the relatively short range. The Research and Development (R&D) project EFA 2014/2 aims to increase the range by adapting energy-efficient driving behaviors e.g. precise speed recommendation while approaching a traffic light. Therefore an advanced driver assistance application has been developed. It comprises the interaction between a vehicle and its surroundings – especially traffic lights – based on Vehicle-to-Infrastructure (V2I) communication since speed

recommendations are only possible by knowing upcoming signal states of the traffic light ahead.

2 Online infrastructure data sources

Traffic management actions require many information that can be obtained e.g. from induction loops, cameras and floating car data (FCD). Utilizing this detected data infrastructure components as traffic lights or variable message signs can be influenced and adapted in order to affect the current traffic flow. Since energy consumption is dependent on traffic flow which is mainly controlled by traffic lights in urban areas, it is necessary to understand how traffic light controls work. A new approach is being established which aims to change the behavior of a single vehicle instead of the traffic flow. Therefor the ascertainment of an individual energy-efficient driving behavior for every single vehicle is being pursued depending on traffic signal states. Signal times and delay times as the most important characteristics are being presented in the following chapters.

2.1 Prediction of signal states

In order to determine an energy-efficient driving behavior while approaching a traffic light, it is essential to know the signal state at the time the vehicle arrives at the stop line. This implicates the necessity of predicting future signal times and not current ones. Since most of the existing traffic lights are traffic actuated, signal times are not fixed and the use of probabilities is required [Kru12]. Traffic actuated traffic light controls contain different signal programs depending on traffic demand which varies from morning over midday to evening hours (Figure 1).

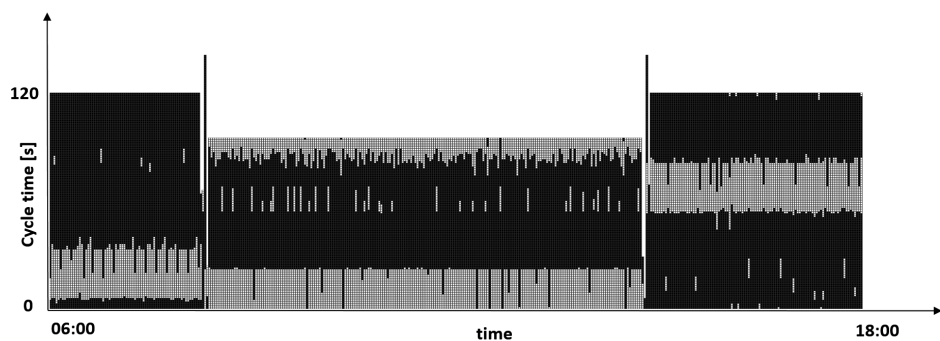


Figure 1: Signal states of a traffic actuated signal program (black = red light; gray = green light).

Within these signal programs there is also the possibility of requesting additional phases by public transport or little frequented directions causing shifted signal times.

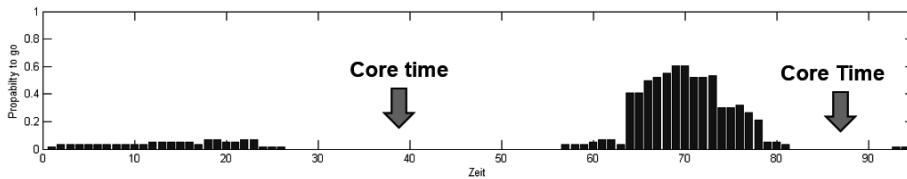


Figure 2: Example of “probability-to-go” values.

To ascertain the predicted probabilities to go, signal states are being simplified to only two states and coded in form of binary vectors. Therefor, “0” relates to the states red, amber and red-amber, and “1” refers only to the state green [Kru14]. This vector composed over a time period of several minutes is being transmitted to the vehicle where energy-efficient driving behavior is being computed (Figure 2).

2.2 Delays due to traffic light signals

Another important fact is the knowledge of congestion in front of traffic light controlled intersections. There are little possibilities measuring the queue length, e.g. with cameras, so that is it more common to estimate the values of queue lengths. The used estimation procedure depends on the disposability of data sources. Statistic and heuristic methods are being applied in case only historic or aggregated data is available. If data of fixed detectors e.g. induction loops are available, approaches like the method of Mück can be utilized [Müc02].

If mobile sensors as FCD are the basis for the prediction, the method of Neumann can be applied [Neu11]. Within this funded project static sensors are being used in order to estimate delay time in seconds and queue length in meters. Both values are being updated every second. In addition to signal times, also congestion affects the traffic light control so that the knowledge of queue length and delay time is essential.

3 Communication Chain and Car Positioning

This part describes the fundamental and technical challenges within the communication chain from traffic light into the vehicle. This includes especially the latency of required information between the traffic lights and the car. Furthermore the directly conjunction of the vehicle position and the needed information in urban scenarios is also a challenge.

These aspects can be well explained by the following example of a driving situation at a multitrack intersection in an urban scenario. The vehicle positioning solution based on GNSS is very poor causing by strong multipath urban environment. Due to this, the positioning solution doesn’t allow a relation of the real driven track. In this case, the car computer doesn’t know which traffic light information (e.g. red or green remaining time) must be displayed for the driver. So, the driver gets all possible traffic light information and must choose the

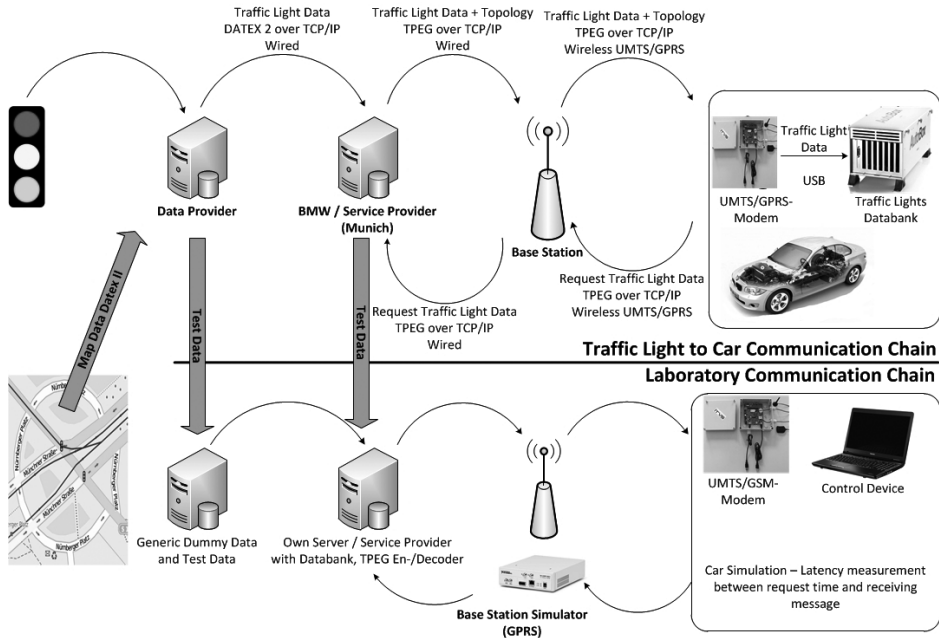


Figure 3: Overview about the Traffic Light to Car Communication Chain and Laboratory Communication Chain.

right one. For avoiding this, a track selection is needed. Furthermore, the displayed traffic light has to be the right one. For this, the whole technical system has to handle the delayed information over the complete communication chain between traffic light and car.

For the communication different types of systems (e.g. GSM/UMTS) and protocols (e.g. TPEG TSI - Transport Protocol Experts Group Traffic Service Information) are used. It's a centralized approach, who defines a central service provider which handles and distributes the needed data. Figure 3 gives an overview on the complete communication chain between traffic light and car. A complete reproduction of the communication chain in a laboratory allows simulation and measurements of the latency between different parts of the chain. So, testing of different latency time measurements and interference scenarios and their solutions for communication are possible.

For car positioning two approaches, Kalman- and Particel Filter, have been investigated. These two filters are state of the art [Bar01] and were combined with an enhanced digital map and preprocessed video data [Gos13].

The video data contains information about the distances to the left and the right lane marks. Furthermore the enhanced digital map provides all lanes for the test scenario in Dresden with additional information like stop markings. This information is deposited as an XML scheme and can be easily virtualized, combined and overlain with other maps. Figure 4 gives an overview about the used car sensors and sensor data. The data is provided via

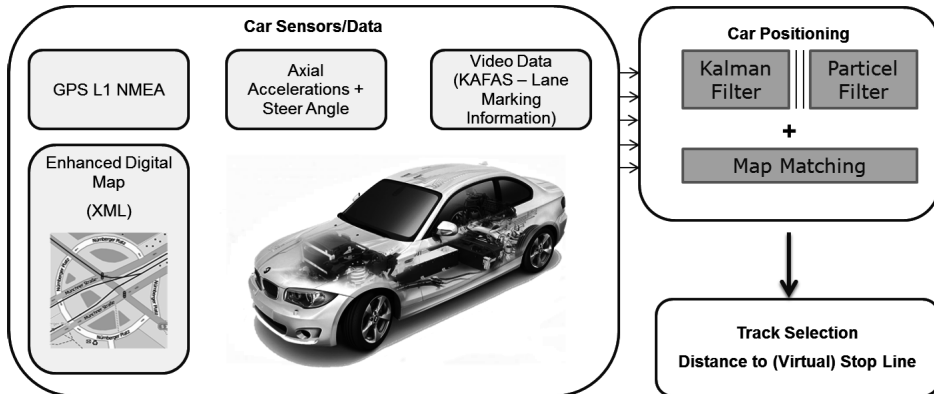


Figure 4: Overview about the car sensors/data and the using positioning algorithms for track selection and distances to (virtual) stop lines.

CAN bus to the car computer and is synchronically sampled for the filters. The idea is to run two filters in parallel for using estimated solutions for track selection. Combined with the additional video data, different hypotheses for lane selection will be examined based on the enhanced digital map. In order to assess the performance of the methods, synthetic data for filter calibration is used at first. After that, real data from the test scenario environment is used for validation. Due to this, a submeter precision (≤ 0.5 m for $\pm 2\sigma$) can be achieved for car positioning in the case of the test environment in Dresden. The value 2σ means the probability of the positioning values is better or equal than 0.5 m in 95.4 % of cases. In 4.6 % of cases the probability of the positioning values is worse than 0.5 m.

4 Human Machine Interface

This chapter deals with the way how the above shown traffic information can be displayed to the driver to influence him to an optimal driving behavior.

4.1 Experimental Vehicle

To validate the developed measures in real traffic an experimental vehicle is used. It is a full electric car manufactured by BMW called ActiveE. A picture of the vehicle can be seen in Figure 5. It is a converted BMW 1 Series Coupe (E82). The electric motor drives the rear axle with up to 125 kW. The vehicle has a lithium-ion-battery with 32 kWh for an electric range up to 160 km.

It is modeled in MATLAB/SIMULINK, to have the opportunity to simulate the energy consumption of the vehicle at different traffic conditions. Additional information on the model can be found in [Sch14].



Figure 5: Experimental Vehicle with in-vehicle measurement system.

4.2 Human interaction

By the merging of vehicle internal and infrastructure information in future driver assistance functions the amount of information for drivers will increase significantly, as the present research project shows.

It is important to make sure that it does not lead to excessive demands of the driver by too much information. Furthermore, it should be noted that the information, will not always be one hundred percent reliable due to the source. Therefore, the forms of representation must be chosen so that the driver assesses the information as helpful even if they are uncertain. This means that the form of representation has a significant impact on the overall acceptance of the system. In the present paper, the approaches are shown to communicate uncertain information for the efficient driving in traffic light approach situations to the driver. As information channels used both for the visual display in the dash panel as well as the haptic feedback via an active accelerator pedal. The installed dash panel of the test vehicle used can be programmed to examine flexible different forms of representation. Near-series illustrations are presented to the driver and the impact on driver behavior through prototypical auxiliary displays can be avoided. With the active accelerator pedal the counter pressure, which the driver has to apply to the operation of the pedal, can be varied dynamically. On the one hand, a direct influence of the driver can be initiated; on the other hand the driver's attention can be stimulated by vibrating the accelerator pedal. For the optical information two areas were defined in the display. One area is for the recommendation, and the other for information (Figure 6).

In the area of recommendation to a range of traveling speed is recommended. With the recommended speed, the next traffic light is reached at a green phase without vehicle standstill. The quality of information is taken such a form into account that a distinction is made between the core times ($\text{prob2go} > 90\%$) and a region of high probability ($90\% > \text{prob2go} > 70\%$). The representation in the information area depends on the current speed relative to the recommended speed. Therefore, the consideration of information quality in the information area is set automatically. If the speed of the vehicle is below a certain level

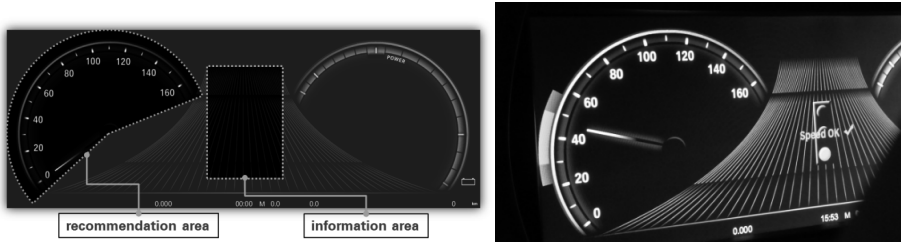


Figure 6: Programmable digital instrument panel.

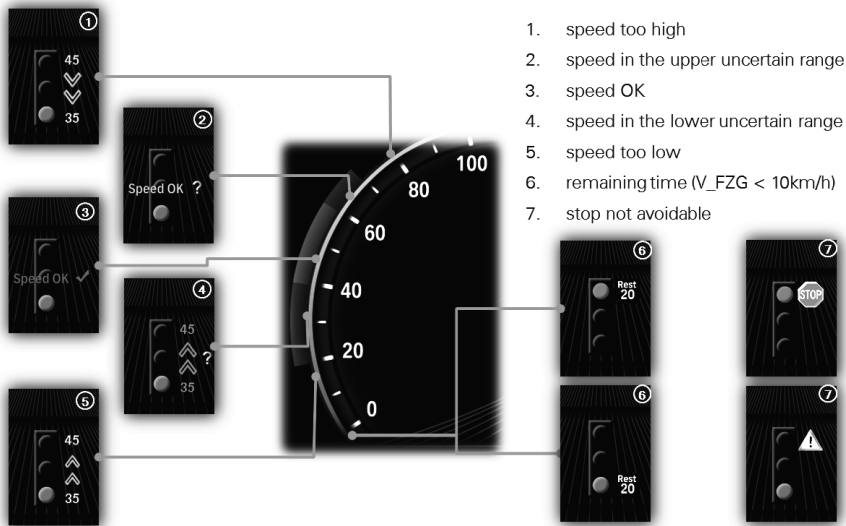


Figure 7: Assignment of information and recommendation.

(10 km/h), the remaining phase duration is displayed. The assignment and the information displayed are shown in Figure 7.

Matching the information of the different areas, the active accelerator pedal is triggered. In cases 1) and 5) the driver is informed by a slight vibration of the pedal that he should optimize its longitudinal dynamic behavior. In cases 2) and 4) the driver is caused by the increase or decrease of the pedal counter pressure to change the speed to the optimal range.

4.3 Validate the benefit of driver assistance in real traffic scenarios

It is very difficult to get reproducible results while validating the effect of driver assistance systems in real traffic. The simulation is a very powerful way to analyze these systems.

Current research in [Ble11; Sch10; Sur11] in the context of traffic light assistance systems (TLAS) and predictive cruise control systems [Asa11] show the high potential of driver assistance systems to realize an energy efficient driving behavior. All of these systems use

the information of traffic lights to calculate an optimal velocity to approach the intersection. Consumption minimizations between 3 % and 5 % [Ble11] and in some situations about 30 % [Sur11] in comparison to the uninformed driver are shown. It is essential to examine the influence of other road users in particular the queue length at the stop line of traffic lights. Currently the scenarios examined are only very simple traffic situations (e.g. one lane, static traffic light programs).

To simulate more complex traffic scenarios a new simulation framework [Sch13] is developed. It is an interface between detailed nanoscopic vehicle simulation with MATLAB/Simulink and traffic flow simulation with SUMO. With different parameters like speed limits, traffic light control, number of lanes, and density of traffic flow the impact of different traffic situations on the energy consumption can be determined. For that purpose a vehicle model (see chapter 5) is used to determine the energy. Different traffic scenarios and their influence on the individual energy consumption are analyzed. The results will show whether these systems are useful and how much the benefit is.

5 First Results

In a first realistic use case the potential of TLAS is shown. A part of an urban route in Dresden with a constant traffic stream is modelled in the SUMO Simulation suite. On basis of [Asa11] a traffic light assistance system is implemented in MATLAB and simulated with the described framework in chapter 4.3. Different parameters like the time of occurrence of the analyzed vehicle are varied.

Besides the reduction of vehicle stops and trip time the energy consumption of a vehicle is relevant. It is calculated with a model [Sch14] of the described vehicle (see chapter 4.1). Figure 8 shows the trajectories of a vehicle for different time of occurrence in the provided road network. Obviously some of the vehicle stops can be prevented.

The consumption for each of these vehicles can be seen in Figure 9. The highest potential for energy consumption is provided for vehicle number 94. Although there are obviously some uncomfortable situations that could cause higher energy consumption (see vehicles 32, 56 and 57 in Figure 9).

These are caused by the effect that in some cases a vehicle with TLAS could pass the next traffic light but this results in an uncomfortable situation at the next traffic light, so the TLAS cannot avoid the vehicle to stop. This demonstrates the need of further research on that topic.

6 Inner Vehicle Measures

The above shown measures are sufficient to apply an energy-efficient driving behavior for electric or conventional vehicles. Taking modern hybrid cars into consideration an optimal control strategy has to be applied additionally.

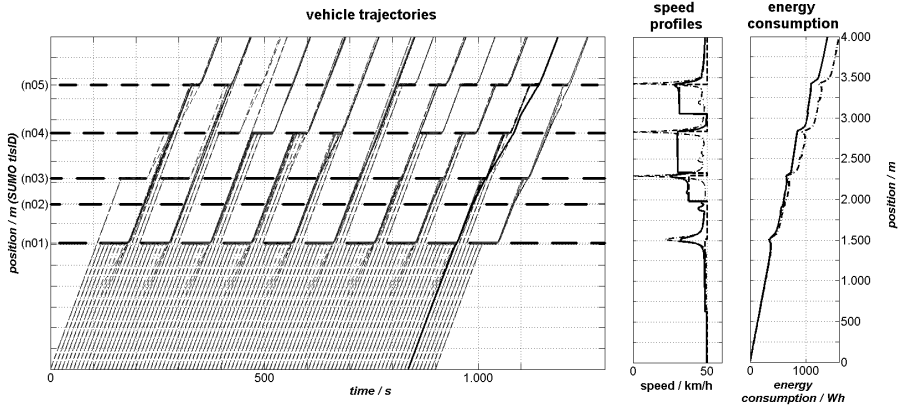


Figure 8: Simulation results: vehicle trajectories and detailed speed profile and energy consumption.

To examine control strategies for hybrid cars the model of the experimental vehicle introduced in chapter 4.1 is changed to an extended-range electric vehicle (EREV) by adding a generator set (GENSET). This set consists of engine and an electric generator with power inverter. The structure of the powertrain is shown in Figure 10.

A main focus lies on the combustion engine of the generator set. The cold starting behavior has a great impact on emissions that cannot be neglected by the control strategy. So the analysis of a suitable combustion engine is necessary. A conversion of a 4-cylinder '1.4 TSI' engine (EA211) of Volkswagen is used on a test bench. The converted engine is a 3-cylinder aspirated direct injection gasoline engine with a displacement of 1 liter to fit the engine power to the requirements [Ein14; Man13]. The results of the test bench are needed to create a model in GT-SUITE which is able to develop engine-specific control strategies und complete the data base for a powertrain control strategy.

The developed control strategy is based on the Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) that was introduced in 2000 by Paganelli [Pag00]. This strategy is originally meant for a parallel hybrid electric vehicle with a small battery. The key idea is to find an equivalence between the energy stored in the battery E_{Bat} and the energy stored in the fuel tank E_{Fuel} . The result is an equivalent energy

$$E_{\lambda} = E_{\text{Fuel}} + \lambda E_{\text{Bat}}$$

where λ is the equivalence factor. The power of the GENSET, which can be chosen freely, has to be determined so that E_{λ} is minimal. The ECMS can be derived from Pontryagin's Maximum Principle, which is a method of the calculus of variations [Ueb14].

An issue is to find the equivalence factor that is different for every track (Figure 11). Therefore an iterative approach called Global Pontryagin Optimization (GPO) is used that calculates λ out of prediction data as seen [Kut11; Ueb14].

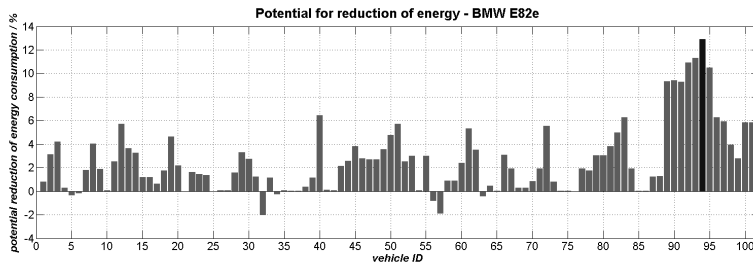


Figure 9: Simulation results: Energy consumption of simulated traffic situations. Vehicle 94 is highlighted with the best potential.

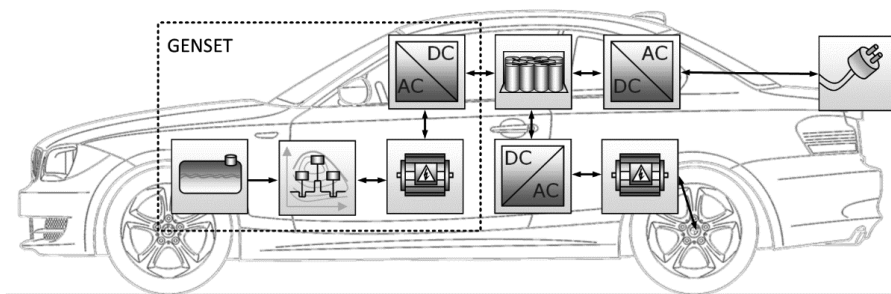


Figure 10: Powertrain of the EREV model.

7 Conclusions

The R&D project EFA 2014/2 is pursuing the approach to obtain infrastructure information of the whole road network, e.g. traffic light information. This information are being broadcasted using the widespread and available mobile communications network. This involves assets and drawbacks e.g. concerning the availability and higher latency times compared to usual directional Wi-Fi connections. In future, needed data streams can be distributed over different communication systems. Therefore, none time critical information (e.g. map data) can be distributed by broadcasting systems like DAB+. For time critical Information (e.g. short-term prediction data) it seems to be suitable to use communication systems with low latency like LTE. In urban areas traffic actuated traffic lights are being utilized now and in the future even more. These traffic light controls are being influenced by traffic flows as well as single vehicles so that it is possible to react dynamically to varying traffic demands. Due to this variation, only a prediction approach is capable. In doing so it is necessary to create an approach that

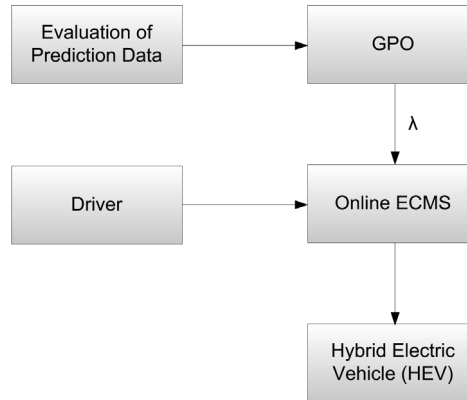


Figure 11: Structure of Control Strategy.

is able to deal with probability-based values. Also the developed energy-efficient driving strategy needs to be adapted to these new conditions.

Results of various simulations show an energy saving potential of about 10 percent by using this developed approach. This kind of driving strategy can also lead to an increasing energy consumption in case the provided data is uncertain. Nevertheless, it could be shown that a wide transmission of signal data can lead to a global optimum regarding to the driving strategy for the whole route. The state of the art is to optimize driving strategies while approaching single traffic lights. Considering all traffic lights on a route may lead to even higher saving potentials. In order to achieve the desired driving strategy the driver is being supported actively by the system. On the one hand, the driver gets driving instructions via a display which can be adopted; on the other hand, an on-board unit pays attention to an efficient realization of these instructions. Therefore, a special display has been developed that is able to deal with probability-based values.

Finally an energy-efficient approach has been created to increase the range of electric vehicles which is transferable to other cities. But what is going to happen if infrastructure as well as vehicles get smarter at the same time?

References

- [Asa11] B. ASADI and A. VAHIDI: “Predictive Cruise Control: Utilizing Upcoming Traffic Signal Information for Improving Fuel Economy and Reducing Trip Time”. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 19.3 (2011), pages 707–714. DOI: 10.1109/TCST.2010.2047860.
- [Bar01] Y. BAR-SHALOM, X. R. LI, and T. KIRUBARAJAN: *Estimation with applications to tracking and navigation: theory algorithms and software*. John Wiley & Sons, 2001. ISBN: 978-0-471-41655-5.

- [Ble11] O. BLEY, R. KUTZNER, B. FRIEDRICH, F. SAUST, J. M. WILLE, M. MAURER, W. NIEBEL, S. NAUMANN, F. WOLF, T. SCHÜLER, K. BOGENBERGER, M. JUNGE, and J. LANGENBERG: “Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung”. In: *AAET 2011 Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig, Feb. 9–11, 2011.
- [Ein14] D. EINERT: “Experimentelle Untersuchungen zum Kaltstart-Warmlaufverhalten an einem Range-Extender Versuchsträger”. Diplomarbeit. Dresden: Technische Universität Dresden, 2014.
- [Gos13] U. GOSDA, R. WEBER, O. MICHLER, S. ZEISBERG, and E. MADEMANN: “Target tracking in wireless sensor networks by data fusion with video-based object detection”. In: *10th Workshop on Positioning Navigation and Communication (WPNC), 2013*. Mar. 20–21, 2013, pages 1–6. DOI: 10.1109/WPNC.2013.6533267.
- [Guh11] C. GUHR: “Verbesserung von Effizienz und Dynamik eines hubraumkleinen turboaufgeladenen 3-Zylinder-DI-Ottomotors durch Abgasrückführung und ein neues Ladeluftkühlkonzept”. PhD thesis. Technische Universität Dresden, 2011.
- [Kru12] M. KRUMNOW: “Schaltzeitprognose verkehrsadaptiver Lichtsignalanlagen im Rahmen des Forschungsprojektes EFA 2014/2”. In: 8. VIMOS-Tagung. Dresden: Kompetenzzentrum für operatives Verkehrsmanagement VIMOS, Nov. 29, 2012.
- [Kru14] M. KRUMNOW: “Schaltzeitprognose verkehrsadaptiver Lichtsignalanlagen im Rahmen des Forschungsprojektes EFA 2014/2”. In: Heureka. Stuttgart, Apr. 2, 2014.
- [Kut11] S. KUTTER and B. BÄKER: “An iterative algorithm for the global optimal predictive control of hybrid electric vehicles”. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) 2011*. Sept. 6–9, 2011, pages 1–6. DOI: 10.1109/VPPC.2011.6043004.
- [Man13] M. MANDAUSCH: “Aufbau und Inbetriebnahme eines für Range-Extender-Betrieb vorgesehenen Versuchsträgers”. Großer Beleg. Dresden: Technische Universität Dresden, 2013.
- [Müc02] J. MÜCK: “Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren”. In: *Tagungsband zur HEUREKA '02 - Optimierung in Verkehr und Transport*. Köln: FGSV Verlag, 2002.
- [Neu11] T. NEUMANN: “Rückstaulängenschätzung an Lichtsignalanlagen mit Floating-Car-Daten”. In: *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrssystemtechnik*. Berlin: Institut für Verkehrssystemtechnik, DLR, 2011.

- [Pag00] G. PAGANELLI, T. GUERRA, S. DELPRAT, J. SANTIN, M. DELHOM, and E. COMBES: “Simulation and assessment of power control strategies for a parallel hybrid car”. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 214.7 (2000), pages 705–717.
- [Sch10] T. SCHUBERT: “Entwurf und Evaluierung einer prädiktiven Fahrstrategie auf Basis von Ampel-Fahrzeug-Kommunikationsdaten”. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, 2010.
- [Sch13] T. SCHUBERT, M. KRUMNOW, B. BÄKER, and J. KRIMMLING: “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*. Edited by T. ALBRECHT, B. JAEKEL, and M. LEHNERT. Dresden: TUDpress, 2013, pages 333–343. ISBN: 978-3-944331-34-8.
- [Sch14] T. SCHUBERT, M. KRUMNOW, B. BÄKER, and J. KRIMMLING: “Analyse eines LSA-Assistenzsystems mittels nanoskopischer Simulation in komplexen Verkehrsszenarien”. In: AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel. Braunschweig, Feb. 12–13, 2014.
- [Sur11] P. SCHURICHT, O. MICHLER, and B. BÄKER: “Efficiency-increasing driver assistance at signalized intersections using predictive traffic state estimation”. In: *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Oct. 5–7, 2011, pages 347–352. DOI: 10.1109/ITSC.2011.6083111.
- [Ueb14] S. UEBEL, C. TEMPELHAHN, L. M., S. KUTTER, and B. BÄKER: “Anwendung der Variationsrechnung für Steuerungsaufgaben im Kraftfahrzeug”. In: *at – Automatisierungstechnik* 62.4 (2014), pages 249–259.

Corresponding author: Mario Krumnow, Technische Universität Dresden, Faculty of Transport and Traffic Sciences “Friedrich List”, Chair of Traffic Control and Process Automation, phone: +49 351 463-36780, e-mail: mario.krumnow@tu-dresden.de

Steigerung der ÖPNV-Qualität durch kooperative Ampelanlagen – Erfolgreiches Modellprojekt in Dresden mit den ersten Fahrerassistenzsystemen für Straßenbahnen

Christian Gassel¹, Björn Schönherr², Tobias Matschek¹, Jürgen Krimmling¹

¹ Technische Universität Dresden

² Dresdner Verkehrsbetriebe AG

Dieser Beitrag wurde veröffentlicht in: Der Nahverkehr, 32.5 (2014), S. 20–25.

1 Motivation

Die allgemeine Betriebsqualität des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) wird durch dessen Zuverlässigkeit, Pünktlichkeit und die Anschlussgewährung wesentlich bestimmt. Beim straßenbündigen ÖPNV unterliegen diese Größen allerdings vielfältigen Einflussfaktoren. Unter anderem führen Schwankungen des Gesamtverkehrsaufkommens, Verlustzeiten an Lichtsignalanlagen (LSA) sowie saisonale und witterungsbedingte Einflüsse zur Streuung von Fahrzeiten. Folglich können über den Streckenverlauf Fahrplanabweichungen von mehreren Minuten auftreten. Derartige Verfrühungen und Verspätungen entsprechen nicht nur einer ungenügenden Pünktlichkeit, sie gefährden zudem die Anschlusssicherung und die korrekte Fahrzeugeinreihung an Einfädelpunkten im Netz.

Um den Kundenanforderungen dennoch gerecht zu werden (Abbildung 1), haben die Dresdner Verkehrsbetriebe (DVB AG) ein Maßnahmenbündel zur Erhöhung der Betriebsqualität verabschiedet. Klassische Beschleunigungsmaßnahmen sind dabei nur ein Teil des Maßnahmenkatalogs, da sie Fahrzeitenstreuungen zwar verringern, nicht aber vermeiden. Im Fokus stehen daher flexibel und dynamisch wirksame Lösungskonzepte, wie sie der Bereich der Verkehrstelematik (Intelligente Verkehrssysteme ITS) bereithält.

Neben der Modernisierung des Rechnergestützten Betriebsleitsystems (RBL) und Verbesserung der Fahrgastinformation wird als entscheidender Baustein eine qualitätsgerechte, intelligente Verkehrssteuerung durch LSA in Kombination mit einem Fahrerassistenzsystem

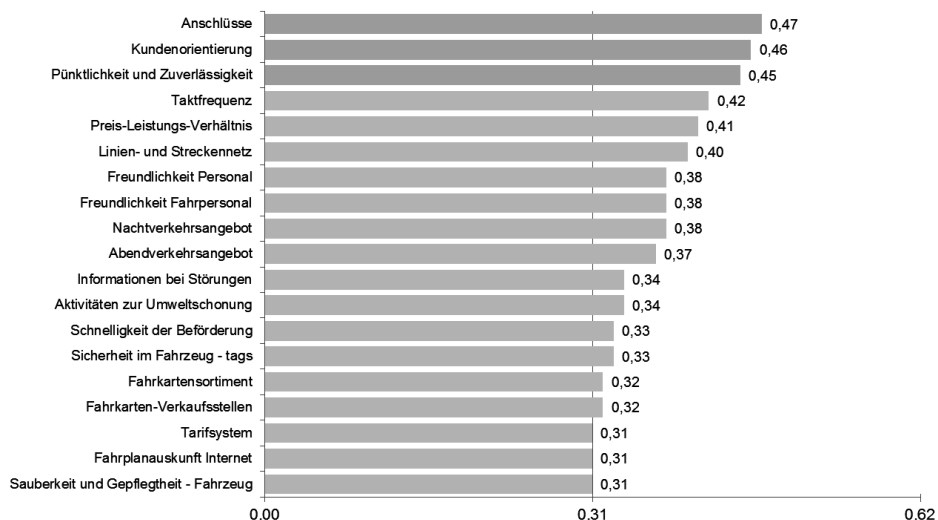


Abbildung 1: Schlüsselmerkmale der Kundenzufriedenheit. [Quelle: TNS Infratest, DVB Kundenbarometer 2012]

eingesetzt. Beide Systeme entwickelte die Technische Universität Dresden. Diese werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

2 Qualitätsgerechte Behandlung des ÖPNV an LSA

In innerstädtischen Bereichen mit hohem Verkehrsaufkommen gibt es oftmals gegensätzliche Anforderungen der verschiedenen Verkehrsteilnehmergruppen. Aus diesem Grund, ist eine absolute Bevorrechtigung für den ÖPNV nicht generell umsetzbar, aber auch nicht sinnvoll. Die TU Dresden entwickelte das Verfahren der *Qualitätsgerechten ÖPNV-Behandlung an LSA* – QLSA, welches sowohl die betrieblichen Belange des ÖPNV als auch die Verkehrslage des Motorisierten Individualverkehrs (MIV) berücksichtigt. Dabei erfolgt eine Priorisierung des ÖPNV untereinander sowie des ÖPNV gegenüber dem MIV. Die folgenden Kriterien werden in einer multikriteriellen Kostenfunktion herangezogen:

- **Fahrplanlage:** Der Parameter wird einerseits zur Aussteuerung der Pünktlichkeit verwendet. Verfrühte ÖV-Fahrzeuge erhalten hierbei im Gegensatz zu verspäteten Fahrzeugen keinen Vorrang. Andererseits dient die Fahrplanlage zur gezielten Einreihung von ÖV-Fahrzeugen an Knotenpunkten, bei welchen eine Beeinflussung der Fahrzeugreihung möglich ist. Die absolute Fahrplanlage (Abweichung in Sekunden) wird hierbei durch eine relative Fahrplanlage ersetzt, welche betrieblich relevante Rahmenbedingungen berücksichtigt (zum Beispiel die verbleibende Restwendezeit). Durch diese Maßnahme kann einer Gefährdung der Wendezeit mit höchster Bevorrechtigung des betroffenen Fahrzeugs auch gegenüber anderen verspäteten ÖPNV-Fahrzeugen begegnet werden.

- **Dynamische Anschlüsse:** Lichtsignalanlagenseitig sollen ausgewählte dynamische Anschlüsse unterstützt werden. Dynamische Anschlüsse sind kundenrelevante Anschlussrelationen, die nicht statisch im Fahrplan ausgewiesen werden, jedoch zufällig im Betrieb auftreten können. Zur Sicherung dieser Anschlüsse werden Abbringer und/oder Zubringer gezielt an der LSA aufgehalten oder beschleunigt.
- **MIV-Verkehrslage:** Durch Berücksichtigung der Verkehrsqualität des Motorisierten Individualverkehrs fallen ÖV-Eingriffe bei schwachen MIV-Verkehrsmengen stärker aus. Das Durchbrechen von MIV-Koordinierungen (Grüne Wellen) bei einer schlechten Verkehrsqualität wird dem ÖV hingegen erschwert.

Unter Kenntnis dieser Einflussgrößen wird jeder realisierbare Freigabebereich mit entsprechenden Kosten bewertet [Mat11]. Nach erfolgter Bewertung wählt QLSA denjenigen Freigabebereich aus, der die geringsten Kosten aufweist. Durch diesen multikriteriellen Ansatz sind sowohl die Abwägung zwischen den konkurrierenden Qualitätsanforderungen von MIV und ÖPNV sowie ÖPNV untereinander an der LSA als auch deren Parametrierbarkeit gegeben.

3 Fahrerassistenz zum vorausschauenden Fahren

Systeme zum vorausschauenden und energieeffizienten Fahren werden bereits seit vielen Jahren im Vollbahn- und Metrobereich eingesetzt [Rai09]. Diese Systeme berechnen die optimale Fahrweise auf dem Fahrzeug in Echtzeit. Entweder wird das Fahrverhalten automatisiert geregelt oder es werden dem Fahrpersonal Fahrempfehlungen zum energiesparenden und sicheren Führen des Fahrzeugs zur Verfügung gestellt. Die genutzten Optimierungsansätze unterscheiden sich sowohl im Betrachtungshorizont (Optimierung eines Zuges/mehrerer Züge, Optimierung bis zum nächsten kommerziellen Halt oder entlang einer Strecke) als auch im mathematischen Lösungsansatz (heuristisch/numerisch) [How95; Liu03]. Im Vollbahnbereich können mit diesen Systemen Energieeinsparungen von fünf bis zehn Prozent erreicht werden.

In Straßenbahnsystemen wurden Assistenzsysteme, welche das Fahrpersonal bei dem vorausschauenden Fahren unterstützen, noch nicht im Regelbetrieb eingesetzt. Die Ursachen liegen in der Komplexität des oberirdischen Verkehrsraums, den mehrere Verkehrsteilnehmergruppen teilen. Im Folgenden wird speziell auf den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen im Straßenbahnbetrieb eingegangen, die unnötige Halte an LSA vermeiden.

Lichtsignalanlagen haben einen signifikanten Einfluss auf das Fahrverhalten zwischen zwei Haltestellen. In der Regel passieren Straßenbahnen auf ihrem Linienweg eine Vielzahl von LSA (Tabelle 1). In der Vergangenheit kamen häufig LSA-Festzeitsteuerungen zum Einsatz, deren Freigabefenster dem Fahrpersonal mit Berufserfahrung bekannt waren. Unnötige Halte konnten teilweise durch vorausschauendes Fahren reduziert werden. Mit dem zunehmenden Einsatz verkehrsabhängiger Steuerverfahren erscheinen LSA-Freigaben aus Sicht des

Fahrpersonals eher zufällig und unvorhersehbar. Die Folge sind energetisch ungünstige und kundenunfreundliche Fahr- und Bremsmanöver sowie Stressaufbau beim Fahrpersonal.

Tabelle 1: Daten zum Straßenbahnsystem in Dresden. [Quelle: DVB 2013]

Kenngrößen (Stand 31.12.2012)		
Linien	-	12
Ø Weg/Linie (Linienlänge)	km	16,9
Ø LSA/Linie	-	41
davon Knoten-LSA	-	25
Haltlicht/Fußgänger LSA	-	12
Bahnübergänge	-	4
Ø LSA-Abstand	m	447
Ø Hst.-Abstand	m	462
Anteil straßenbündiger Fahrweg	%	56
Pünktlichkeit (Jahresdurchschnitt)	%	76,1
Reisegeschwindigkeit (A-Fahrzeit)	km/h	19,1

Um das Fahrpersonal bei der optimalen Annäherung an LSA zu unterstützen, wurde an der TU Dresden das Fahrerassistenzsystem COSEL (Computer-Optimised Speed control for Energy-efficient Light-rails) mit den folgenden Zielen entwickelt:

- Senkung des Energieverbrauchs durch das Vermeiden unnötiger Halte,
- Verbesserung der Kundenzufriedenheit durch höheren Fahrkomfort und Verlagerung von LSA-Verlustzeiten auf längere Aufenthalte an Haltestellen,
- Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Stressabbau beim Fahrpersonal,
- Gesamtverkehrsoptimierung durch zielgenaues Erreichen kurzer ÖPNV-Freigabefenster.

Im Folgenden wird die Funktionsweise des Systems COSEL im Detail beschrieben.

3.1 Ermittlung des optimalen Querungszeitpunkts an der LSA

Das Verfahren erfordert zunächst die Kenntnis über den garantierten Freigabebereich (Lösungsmenge) von der kooperativen LSA für das zu beeinflussende Fahrzeug [Mat11; Gas13]. Anschließend wird der Zielzeitpunkt t_{opt} ermittelt, zu dem das Fahrzeug den Freigabebereich exakt passieren soll.

Der Zielzeitpunkt wird innerhalb des Freigabebereichs unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit des Verkehrsknotens und der Betriebsqualität des Verkehrsunternehmens berechnet. In der Regel liegt der Zielzeitpunkt so früh wie möglich innerhalb des Freigabebereichs. Dadurch werden der ÖPNV-Eingriff auf den Knotenpunkt und die ÖPNV-Verlustzeit an der LSA minimiert. Aus Gründen der Verkehrssicherheit entspricht der Zielzeitpunkt allerdings nicht genau dem Freigabebeginn. Damit das Fahrpersonal bereits in der Annäherung

an die LSA auf einen fahrzeigenden Signalbegriff zufährt, wird der Zielzeitpunkt um wenige Sekunden hinter den Freigabebeginn verschoben.

3.2 Berechnung der optimalen Annäherungsstrategie an die LSA

Das Fahrerassistenzsystem COSEL greift mit der Beeinflussung von Haltestellenaufenthaltszeit und Fahrweise zwei Beeinflussungsarten auf, um letztlich unnötige Halte an LSA zu vermeiden.

Beeinflussung der Fahrweise

Der Fahrer erhält während der Fahrt zwischen zwei kommerziellen Halten Fahrempfehlungen zur energieoptimalen Annäherung, um den Zielzeitpunkt an der LSA zu erreichen. Als Grundlage zur Berechnung der energieoptimalen Fahrtrajektorie dient das Maximumprinzip nach Pontrjagin [Liu03]. Demnach gelten vier Fahrregime als optimal:

- Antrieb mit maximal zulässiger Beschleunigung,
- Beharrungsfahrt mit konstanter Beschleunigung,
- Ausrollen ohne Traktionsenergieverbrauch sowie
- Bremsen mit maximal zulässiger Betriebsbremsverzögerung.

Diese sequenzielle Abfolge der Regime kann aber auch variieren. Beispielsweise ist ein Ausrollen bis zur maximal zulässigen Geschwindigkeit bei starkem Gefälle auch vor der Beharrungsfahrt zulässig [Alb12].

Nach Abfahrt an der Haltestelle berechnet COSEL die Umschaltunkte zwischen den oben genannten Fahrregimen unter Kenntnis der jeweils aktuellen Position und Geschwindigkeit des Fahrzeugs sowie des Zielzustands (Zielzeitpunkt an der LSA). Dabei werden fahrzeugseitige (zum Beispiel Fahrdynamik) und infrastrukturseitige Einflussgrößen (Gradienten, Geschwindigkeitsbegrenzungen, Trenner) berücksichtigt. Anschließend werden die Fahrregime dem Fahrpersonal grafisch und akustisch mitgeteilt.

Da aus verschiedenen Gründen das empfohlene Fahrregime nicht immer eingehalten werden kann, wird seitens des Systems permanent das tatsächliche Fahrverhalten der berechneten Trajektorie gegenübergestellt. Aus regelungstechnischer Sicht ist das Assistenzsystem damit Bestandteil eines Regelkreises bei dem letztlich der Fahrer als Steller agiert und mit dem Fahrhebel das Fahrverhalten des Fahrzeugs beeinflusst (Abbildung 2). Generelle Abweichungen vom Sollverhalten werden zwar durch exakte Modellierung, benutzerfreundliche Schnittstellen und Vorgaben des Verkehrsunternehmens minimiert. Dennoch ist ein vollständiges Vermeiden aus verschiedenen Gründen nicht möglich (Fahrerakzeptanz, witterungsbedingte Einflüsse auf Brems- und Beschleunigungsverhalten et cetera). Diese Gründe werden in der Regelungstechnik als Störgrößen bezeichnet, wobei Stören ein Abweichen vom angestrebten Optimum bedeutet (Abbildung 2). Eine Messeinrichtung ist deswegen

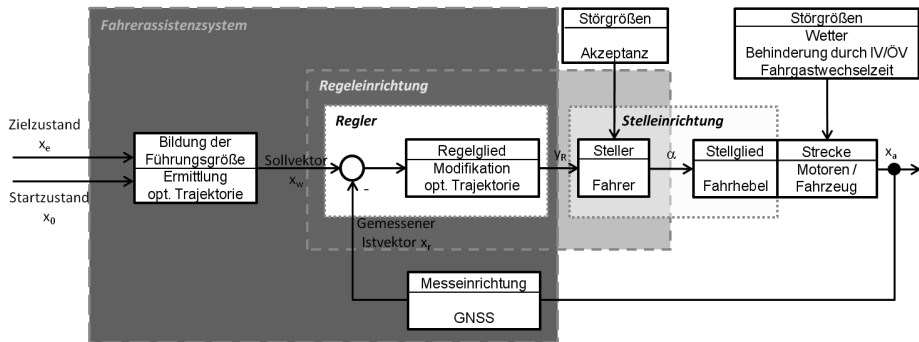


Abbildung 2: Aufgaben des Fahrerassistenzsystems innerhalb des Wirkungsplans der energieoptimalen Regelung.

erforderlich (GNSS-Systeme oder Odo- sowie Tachometer), wodurch COSEL Abweichungen vom Sollverhalten erfasst und gegebenenfalls eine Anpassung der Fahrempfehlung vornimmt.

Beeinflussung der Haltestellenaufenthaltszeit

Allein die Beeinflussung der Fahrweise reicht im städtischen Personennahverkehr jedoch nicht aus, um unerwünschte Halte an LSA zu verhindern. Die Ursachen liegen in den teilweise relativ kurzen Fahrtwegen vom kommerziellen Halt bis zur LSA sowie in den erforderlichen Mindestannäherungsgeschwindigkeiten begründet. Vorgaben zur Mindestgeschwindigkeit sind einerseits aus Gründen der Akzeptanz des Fahrpersonals notwendig. Andererseits kann die Behinderung anderer Verkehrsteilnehmer dadurch begrenzt werden.

Abbildung 3 stellt die Problematik grafisch dar. Eine 400 m entfernte LSA kann nur durch die alleinige Beeinflussung der Fahrweise ohne Halt passiert werden, wenn der Freigabebereich zwischen 40 s (zeitoptimale Fahrt) und 60 s (Fahrt mit Mindestgeschwindigkeit) nach Abfahrt an der vorherigen Haltestelle realisierbar ist. Spätere Freigaben können aufgrund der Beschränkung der Mindestgeschwindigkeit nicht ohne Halt passiert werden.

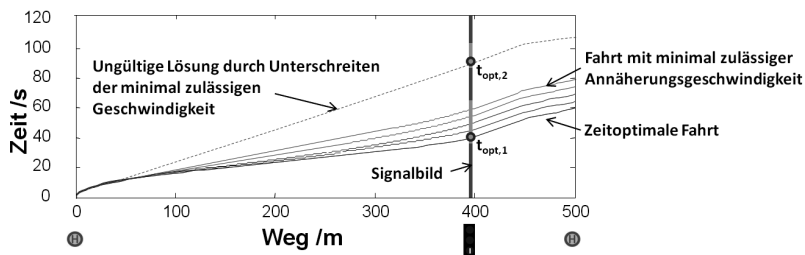


Abbildung 3: Grenzen der Beeinflussung der Fahrweise ohne Modifikation der Haltestellenaufenthaltszeit.

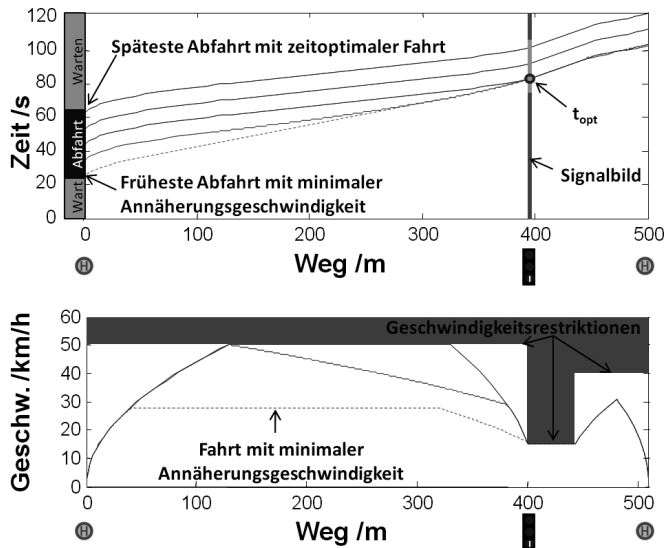


Abbildung 4: Kombination aus optimalen Fahrstrategien und Empfehlungen an der Haltestelle.

Um diesem Problem Rechnung zu tragen, beeinflusst das Assistenzsystem COSEL auch die Haltestellenaufenthaltszeit. An der Haltestelle vor der LSA erhält der Fahrer die Information zum optimalen Abfahrtszeitpunkt.

Abbildung 4 zeigt die Kombination aus Beeinflussung der Haltestellenaufenthaltszeit und Fahrweise. Wenn das Fahrzeug nach Abfahrt an der Haltestelle auch mit Mindestgeschwindigkeit an der nächsten LSA noch vor der Freigabe eintreffen würde, dann wird dem Fahrpersonal ein Countdown an der Haltestelle dargestellt (von Sekunde 0-20 an der Haltestelle). Durch diesen Ansatz können Fahrgäste, im Gegensatz zum unnötigen Halt an der LSA, dem Fahrzeug noch zusteigen. Diese örtlich-zeitliche Verlagerung der Haltezeit an den kommerziellen Halt führt zu einer Vergrößerung des fahrgastwirksamen Anteils an der Gesamthaltezeit.

Sobald der optimale Zielzeitpunkt mit einer zulässigen Annäherungsgeschwindigkeit erreicht werden kann, erfolgt die Abfahrtsempfehlung (zwischen Sekunde 20 und 60). Erst wenn mit zeitoptimaler Fahrt der Freigabebereich verpasst werden würde, erscheint wieder ein Countdown. Die Wartezeit wird unter Nutzung des nächstmöglichen Freigabefensters ermittelt.

4 Implementierung und praktische Erfahrungen

Dank nationaler und internationaler Förderung (GVFG, EFRE) haben die Partner Landeshauptstadt Dresden, DVB AG und TU Dresden das Projekt *LSA-Optimierung im Zuge der Nord-Süd-Verbindung Dresden 2006* gestartet. Im Rahmen des Projektes wurden sowohl die qualitätsgerechte LSA-Beeinflussung QLSA als auch das Fahrerassistenzsystem COSEL entwi-

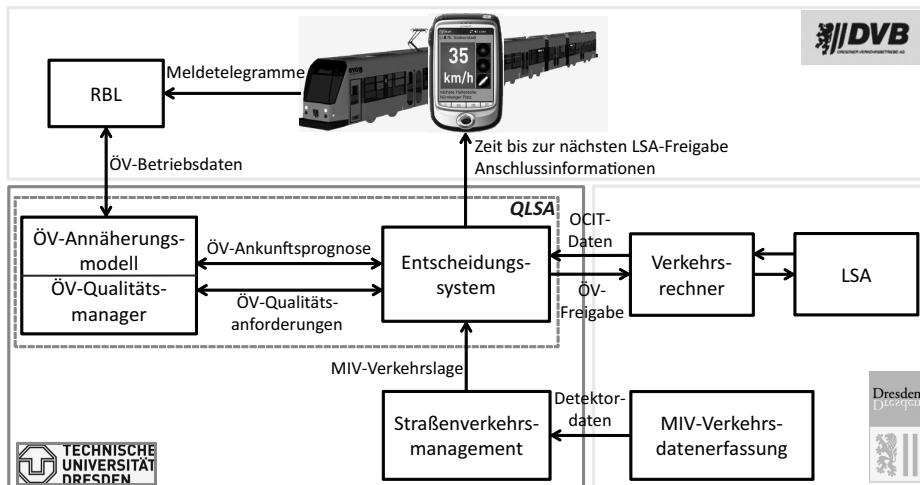


Abbildung 5: Systemarchitektur Dresden.

ckelt und in die Praxis überführt. Das Projekt gliedert sich in drei Phasen. 2006 bis 2010 wurden die theoretischen Grundlagen erarbeitet. In den Jahren 2011 und 2012 erfolgten Praxistests am Pilotknoten Nürnberger Platz. Seit 2013 werden die Verfahren auf 19 LSA im Zuge der Nord-Süd-Verbindung Dresdens übertragen.

4.1 Systemarchitektur

Um den multikriteriellen Optimierungsansatz zu ermöglichen, wurden zwei Verkehrsmanagementsysteme mit QLSA verknüpft (Abbildung 5). Das Dresdner Straßenverkehrsmanagementsystem VAMOS versorgt die qualitätsgerechte Steuerung mit MIV-Verkehrslagedaten in Echtzeit. Außerdem werden vom Rechnergestützten Betriebsleitsystem der DVB relevante Betriebsdaten abgerufen (Sollfahrplandaten, tatsächliche Fahrzeugpositionsdaten, geplante Anschlüsse et cetera). Als Bestandteil von QLSA veredelt ein ÖV-Annäherungsmodell diese Daten anschließend mit einer sekundenfeinen ÖV-Ankunftsprognose für die zu beeinflussenden Lichtsignalanlagen. Daraufhin kann QLSA die verfügbaren Freigabeoptionen ermitteln.

Diese Optionen werden aus Sicht der ÖPNV-Qualitätsanforderungen durch einen Qualitätsmanager bewertet (zum Beispiel hinsichtlich der Eignung für einen dynamischen Anschluss). Letztendlich entscheidet QLSA, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, über den optimalen Freigabebereich aus Sicht von MIV und ÖPNV. Dieser zu realisierende Freigabebereich wird über den Verkehrsrechner bei der LSA angemeldet und realisiert sowie an das Fahrerassistenzsystem gesendet. Die Berechnung der optimalen Annäherung an die LSA erfolgt auf dem Fahrzeug.

Die vom Assistenzsystem ermittelte Fahrempfehlung wird anschließend wieder dem Entscheidungssystem mitgeteilt. Die Anmeldung des ÖV-Fahrzeugs kann unter Berücksichtigung

der Fahrempfehlung zeitgerecht erfolgen. Verlustzeiten von „feindlichen“ Verkehrsströmen werden dadurch minimiert.

QLSA ist zudem in der Lage, dem RBL fahrgastrelevante Informationen zur Verfügung zu stellen, die direkten Bezug zur LSA-Steuerung haben. Dazu zählen genauere Fahrzeitprognosen unter Berücksichtigung der LSA-Schaltung im Prognosehorizont von unter zwei Minuten sowie Informationen zur Sicherung dynamischer Anschlüsse.

4.2 Auswirkungen der qualitätsgerechten LSA-Steuerung

Die Qualitätsgerechte LSA-Steuerung (QLSA) beeinflusst zum aktuellen Stand fünf Lichtsignalanlagen (Streckenzug Nürnberger Platz bis Friedrich-List-Platz) auf dem südlichen Teil der Nord-Süd-Verbindung (Stand Februar 2014, Abbildung 6). Auf diesem etwa ein Kilometer langen Abschnitt verkehren die Straßenbahnlinien 3 und 8. Beide Linien verkehren in der Hauptverkehrszeit im Zehn-Minuten-Takt.

Insbesondere am Nürnberger Platz kann den beiden Linien eine absolute Bevorrechtigung nicht gewährt werden, da die Linienführung im Konflikt mit der kreuzenden MIV-Hauptverkehrsrouten des südlichen Dresdner Straßennetzes steht. Diese Verkehrsachse weist ein durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen (DTV) von 28.000 Fahrzeugen auf, steht in Koordinierung mit den Nachbarknoten und dient als Umleitungsstrecke der naheliegenden Bundesautobahn. QLSA entscheidet seit 2011 unter den Gesichtspunkten der ÖPNV-Verkehrsqualität und MIV-Verkehrslage über die ÖPNV-Behandlung am Knotenpunkt.

Die Auswirkung einer der Einflussgrößen – die Fahrplanlage – auf die ÖV-Behandlung am Nürnberger Platz wird in Abbildung 7 dargestellt. Die Ergebnisse sind allein auf QLSA zurückzuführen, da das Assistenzsystem im dargestellten Untersuchungszeitraum noch nicht zum Einsatz kam. Die Ergebnisse zeigen, dass die vorherige verkehrsabhängige Steuerung den ÖPNV unabhängig von der Fahrplanlage behandelt hat. Dadurch sind die mittlere Verlustzeit und Haltequote am Knotenpunkt über der Fahrplanlage etwa konstant. Im Gegensatz dazu, tendiert QLSA durch Berücksichtigung der Fahrplanlage dahin, verspäteten Fahrzeugen eine höhere Priorität einzuräumen als Fahrzeugen die verfrüht verkehren. Dadurch reduzieren sich sowohl die Verlustzeiten als auch die Haltequoten mit zunehmender Verspätung. QLSA hält sogar verfrühte Fahrzeuge stärker auf, als es in der verkehrsabhängigen Steuerung der Fall war. Dadurch werden Verfrühungen reduziert, die Qualität des MIV steigt. Hinsichtlich der Fahrzeiteinsparung ist bereits an diesem einzelnen Knoten eine Verringerung der Verlustzeiten von über zehn Sekunden möglich sowie eine Reduktion der Haltequote von 75 auf 46 Prozent (bei einer Verspätung von über zwei Minuten).

Aufgrund des multikriteriellen Optimierungsansatzes kann allerdings im Einzelfall auch ein verspätetes Fahrzeug aufgehalten werden, etwa aufgrund einer gleichzeitig konkurrierenden ÖPNV-Anforderung oder durch eine schlechte MIV-Verkehrslage. Für den Fall einer guten MIV-Verkehrslage (LOS A/B) fällt die Haltequote für verspätete ÖPNV-Fahrzeuge der Linie 3 landwärts unter 40 Prozent. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Reduktion der Haltequote, was bereits zu Energieeinsparungen führen kann. Modellierungsergebnisse und Messungen



Abbildung 6: Streckenzug Nord-Süd-Verbindung Dresden.

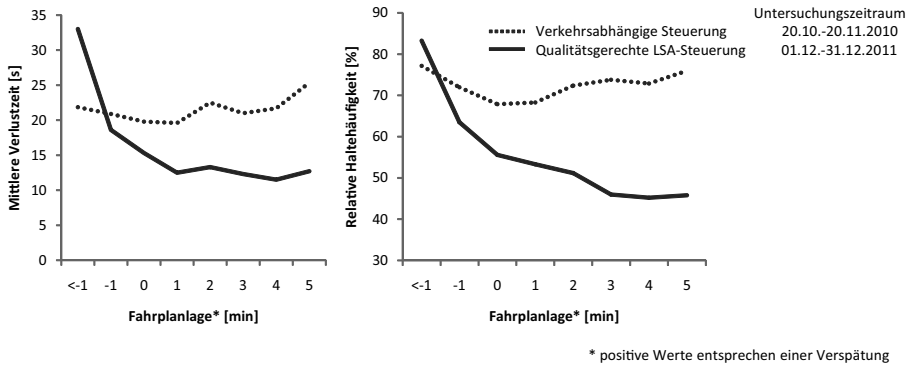


Abbildung 7: Mittlere Verlustzeiten (links) und Haltequoten (rechts) in Abhängigkeit zur Fahrplanlage am Nürnberger Platz (Linie 3 landwärts, ohne Fahrerassistenz).

mit der Dresdner Messstraßenbahn bestätigen ein Einsparpotenzial des Traktionsenergieverbrauchs. Das Potenzial hängt wesentlich von der Geschwindigkeit ab, die im Knotenbereich ohne Halt gefahren werden kann, beziehungsweise auf die beschleunigt werden muss, wenn es zum Halt an der LSA kommt. Abbildung 8 stellt diesen Zusammenhang dar. Die Reduktion des Traktionsenergieverbrauchs beträgt 0,2 bis 1,0 kWh pro eingesparten Halt.

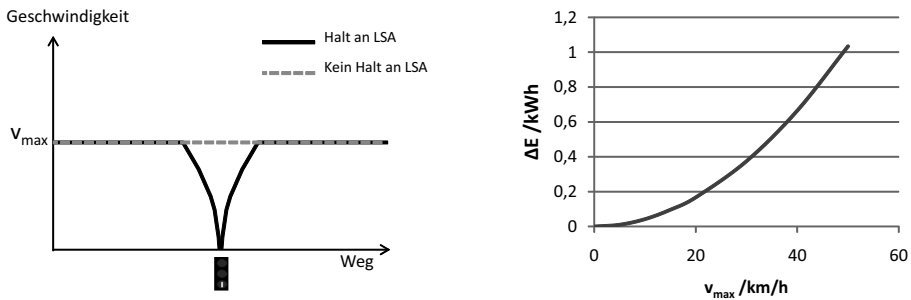


Abbildung 8: Übliche Fahrtrajektorien ohne Assistenzsystem (links) und Energieeinsparungen durch Haltvermeidung (rechts) mittels QLSA.

4.3 Erkenntnisse zum Fahrerassistenzsystem

Zusätzlich zu QLSA wurde seit Juni 2012 das Fahrerassistenzsystem COSEL bei den Dresdner Verkehrsbetrieben eingesetzt. Damit sollen die Vorteile von QLSA und Fahrerassistenz kombiniert werden. COSEL ist das erste Fahrerassistenzsystem, welches im Regelbetrieb von Straßenbahnen zum Einsatz kommt und das Fahrpersonal unterstützt, unnötige Halte an Lichtsignalanlagen zu vermeiden. COSEL berechnet die energieoptimale Fahrweise und

ermöglicht damit das komfortable Fahren für den Fahrgast, indem unnötige Brems- und Beschleunigungsvorgänge vermieden werden.

Da aufgrund des erstmaligen Einsatzes im Straßenbahnbereich keine Erfahrungen vorlagen, wurden zwei Migrationsstufen arrangiert. Zunächst erhielten zwölf freiwillige Fahrer das System zur Evaluation im Praxisbetrieb. Zum einen flossen Optimierungsvorschläge des Fahrpersonals iterativ in die Entwicklung des Systems ein. Zum anderen haben monatlich mehrere hundert Fahrten die Fahrtauglichkeit der berechneten Fahrempfehlungen im städtischen Umfeld bestätigt.

Auf der Abbildung 9 (oben) werden zwei Fahrten zwischen der Haltestelle Reichenbachstraße und dem Verkehrsknoten Nürnberger Platz dargestellt. COSEL berechnet auf diesem Abschnitt die optimale Fahrempfehlung unter Berücksichtigung von zwei LSA. Trotz der starken Neigungswechsel auf dem Streckenabschnitt (bis zu vier Prozent) ist das Fahrpersonal in der Lage, den Fahrempfehlungen zu folgen und letztlich den Halt an den LSA zu vermeiden. Solange das Fahrerassistenzsystem nicht im Bordrechner integriert ist, kommt es auf der Hardware eines Smartphones zum Einsatz. Das Gerät ist dazu im Fahrerraum installiert (Abbildung 9, unten).

In dieser ersten Migrationsstufe fiel die durchschnittliche Haltequote der Straßenbahnfahrten mit Fahrempfehlungen von COSEL auf 24 Prozent (Tabelle 2). Obwohl das Fahrerassistenzsystem lediglich Empfehlungen ausgibt, sind tatsächlich eine Anpassung des Fahrverhaltens und eine deutliche Reduktion der Haltequote festzustellen. Diese Tatsache spricht für eine hohe Akzeptanz und Verlässlichkeit des Systems. Selbst Freigabebereiche mit einer Mindestfreigabezeit von nur fünf Sekunden können zeitgerecht mit Unterstützung des Assistenzsystems erreicht werden. Dadurch wird der Einfluss des Öffentlichen Verkehrs auf den Gesamttablauf des Knotenpunktes minimiert. Die verbleibenden Halte sind auf technische Ursachen (zum Beispiel defekte Infrastrukturkomponenten) sowie das Austesten von Grenzen und Möglichkeiten des Systems durch das Fahrpersonal zurückzuführen.

Tabelle 2: Entwicklung der Haltequote am Nürnberger Platz (Linie 3 landwärts).

Steuerverfahren	Untersuchungszeitraum	Haltequote
Verkehrsabhängige Steuerung	10.2010 – 11.2010	0.70
QLSA (ohne Assistenzsystem)	12.2011	0.52
QLSA (mit Assistenzsystem)	06.2012 – 08.2013	0.24

Um die netzweiten energetischen und betrieblichen Effekte zu erfassen, wurde die erste Migrationsstufe im August 2013 abgeschlossen. In einer zweiten Stufe wurde im Herbst 2013 die Hälfte aller Straßenbahnfahrzeuge mit einem Fahrerassistenzsystem ausgerüstet (83 Fahrzeuge des Typs NGT D8DD und D12DD). Seitdem kann das gesamte Straßenbahn-Fahrpersonal das Assistenzsystem auf dem südlichen Streckenzug der Nord-Süd-Verbindung nutzen.

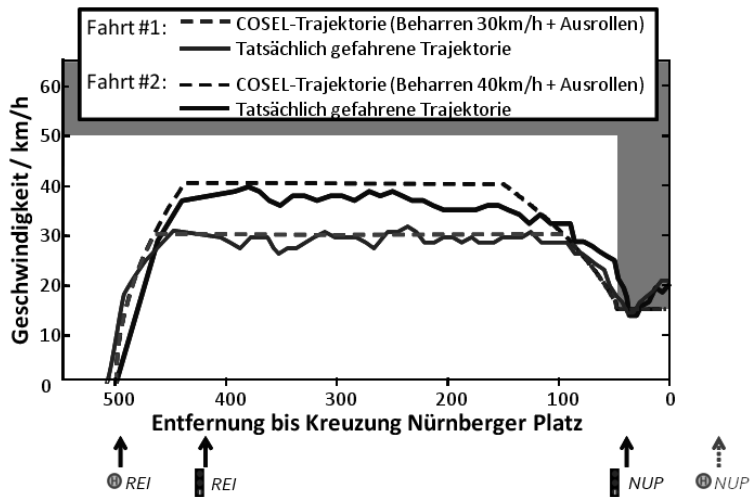


Abbildung 9: Fahrerassistenzsystem COSEL (oben: zwei Fahrten mit Fahrempfehlung und tatsächliche Fahrweise; unten: Integration von COSEL mobile im Fahrerraum).

5 Ausblick

Im Jahr 2014 wird der Einsatz der qualitätsgerechten LSA-Steuerung und des Fahrerassistenzsystems auf die gesamte Nord-Süd-Verbindung Dresdens mit einer Länge von 4,2 km ausgedehnt. Mit der Parametrierbarkeit der Kostenfunktionen von QLSA lassen sich dann Feinjustierungen an Einzelknoten und netzweit vornehmen, die den Abwägungsprozess zwischen Interessen des MIV und ÖV regeln. Die positive Wirkung von QLSA auf die Betriebsqualität zeichnet sich bereits ab. Durch die Umsetzung über den gesamten Streckenzug der Nord-Süd-Verbindung können dann Möglichkeiten und Grenzen eines solchen Gesamtsystems bewertet werden.

Ziel der DVB ist insbesondere ein Beitrag zur Verbesserung der Pünktlichkeit (Fahrplanlage 0 bis 2 min Verspätung) von derzeit 76,1 Prozent im Gesamtnetz auf 90 Prozent (Stadttratsbeschluss der Landeshauptstadt Dresden 2007). Der Beitrag von QLSA und Fahrerassistenz wird mit der vollständigen Netzsteuerung zu bewerten sein. Unbenommen vom weiteren strecken- und netzbezogenen Ausbau kann als Resümee bereits eine Steigerung der Verkehrsqualität des ÖPNV bei gleichbleibender Verkehrsqualität des MIV festgestellt werden.

Hinsichtlich des Assistenzsystems ergeben sich auf dem gesamten Streckenzug neben der optimalen Annäherung an LSA weitere Anwendungsfälle. So lassen sich unnötige Halte im Vorfeld einiger Haltestellen vermeiden, wenn diese bereits belegt sind. Dazu können vergleichbar zur LSA optimale Zielzeitpunkte an der Haltestelle vom ÖPNV-Annäherungsmodul berechnet werden, welche anschließend der energieoptimalen Annäherung an die kommende Haltestelle dienen. Außerdem werden die Anforderungen definiert, um das Assistenzsystem zukünftig auch als integrierte Komponente von On-Board-Units und Bordrechnern anbieten zu können.

Literaturverzeichnis

- [Alb12] T. ALBRECHT, A. BINDER und C. GASSEL: „Applications of real-time speed control in rail-bound public transport systems“. In: *IET Intelligent Transportation Systems* 7.3 (2012), Seiten 305–314. DOI: 10.1049/iet-its.2011.0187.
- [Gas13] C. GASSEL und J. KRIMMLING: „Effects of Cooperative Traffic Signals on Tramway Operation“. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems 2013*. Herausgegeben von T. ALBRECHT, B. JAEKEL und M. LEHNERT. Dresden: TUDpress, 2013, Seiten 301–310. ISBN: 978-3-944331-34-8.
- [How95] P. G. HOWLETT und P. J. PUDNEY: *Energy-Efficient Train Control*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1995. ISBN: 978-1-4471-3086-4.
- [Liu03] R. R. LIU und I. M. GOLOVITCHER: „Energy-efficient operation of rail vehicles“. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 37.10 (2003), Seiten 917–932. DOI: 10.1016/j.tra.2003.07.001.

- [Mat11] T. MATSCHEK, C. GASSEL und J. KRIMMLING: „Cooperative Traffic Lights Under Consideration Of The Needs Of Public Transport And Motorized Individual Transport“. In: *8th European Congress and Exhibition on Intelligent Transportsystems and Services*. Lyon, 6.–9. Juni 2011.
- [Rai09] RAIL SAFETY AND STANDARDS BOARD LTD.: *Driver advisory information for energy management and regulation*. Band Stage 1 Report. 2009.

Korrespondierender Autor: Christian Gassel, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Telefon: +49 351 463-36749, E-Mail: christian.gassel@tu-dresden.de

Kostensenkung durch Reduktion von Leistungsspitzen bei Gleichstrombahnen – Vorstellung des Gleichstromleistungsspitzenanalyse- und -vermeidungs-Systems (GLAS)

Martin Lehnert¹, Thomas Albrecht¹, Lutz Langerwisch²

¹ Technische Universität Dresden

² ASCI Systemhaus GmbH, Berlin

Dieser Beitrag wurde veröffentlicht in: Der Nahverkehr, 32.11 (2014), S. 21–27.

1 Einführung

Bei Straßenbahnen treten aufgrund der Systemeigenschaften (Fahrt auf Sicht, kurze Haltestellenabstände, Überlagerung mehrerer Linien in dichter Taktfolge, hohe Streuung von Verspätungen, Beeinflussung durch den Individualverkehr, gleichzeitiges Grün an Lichtsignalanlagen) Leistungsspitzen im Normalbetrieb auf. Die Kombination verschiedener Faktoren führt zu einer Erhöhung der Werte. Darüber hinaus entstehen Leistungsspitzen nach Störungen des Betriebs, beispielsweise aufgrund von Unfällen mit oder von anderen Verkehrsteilnehmern auf dem Fahrweg und daraus resultierender Pulkbildung betroffener Bahnen.

Mit GLAS wurde ein System entwickelt, mit dem unter konsequenter Beachtung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten sowie der straßenbahntypischen Randbedingungen gezielte Maßnahmen zur Reduzierung abrechnungsrelevanter Leistungsspitzen bei den Elektrizitätskosten betrieblich umgesetzt werden und – speziell nach Unfällen auf dem Gleiskörper – ein automatischer Wiederanlauf des Betriebs ermöglicht wird, ohne dass eine zusätzliche Leistungsspitze erzeugt, die Zeitdauer des Störungszustandes verlängert oder die Qualität des ÖPNV negativ beeinflusst wird.

Die Einführung von GLAS ist in drei Prozessschritte gegliedert. Im ersten Schritt werden die Elektrizitätskostenstruktur des Unternehmens und der Leistungsgang in den Unterwerken (UW) anhand historischer, gemessener Leistungsgänge analysiert. Anschließend erfolgt im zweiten Schritt eine Potenzialermittlung für die Leistungsspitzenreduzierung über detaillierte,

nicht echtzeitfähige Betriebs- und elektrische Netzsimulationen mit typischen Störungsszenarien.

Für die Echtzeitregelung des Betriebs im dritten Schritt wurde eine Software entwickelt, die folgende Punkte umfasst:

- Automatisierte Erkennung von Störungen im Betriebsablauf durch Auswertung von Informationen des rechnergestützten Betriebsleitsystems (ITCS),
- Generieren verschiedener betrieblicher Szenarien für eine mögliche Fortsetzung des Betriebsablaufs,
- Prognose der durch diese Szenarien entstehenden Leistungsbelastungen jedes UW in Echtzeit,
- Bewerten der Szenarien und Ableiten von Handlungsempfehlungen für die betroffenen Fahrzeugführer,
- Visualisierung dieser Empfehlungen in der ITCS-Zentrale im Kontext der Betriebslage und Unterwerksleistungen sowie Übertragen und Anzeigen der Fahrempfehlungen auf den Fahrzeugen.

Diese drei Schritte und insbesondere die Punkte der Echtzeitregelung werden nachfolgend vorgestellt. Die Ausführungen werden anhand von Beispielen illustriert, die mehrheitlich in Zusammenarbeit mit dem assoziierten Praxispartner des Projekts, der Stadtverkehrsgesellschaft mbH Frankfurt (Oder) (SVF), entstanden sind.

2 Elektrizitätskostenstruktur und Unterwerksleistungsgänge

2.1 Zusammenhang zwischen Leistungsspitze und Elektrizitätskosten

Ziel des Projekts GLAS ist die Reduzierung der Elektrizitätskosten durch Beeinflussung der abrechnungsrelevanten Leistungsspitzen im Energieversorgungsnetz. Dafür war der Zusammenhang von Leistungsspitzen und deren Auswirkung in der Elektrizitätskostenabrechnung aufzuklären. In einer studentischen Projektarbeit wurden hierzu zahlreiche Verkehrsunternehmen befragt. Dabei wurde klar, dass es sehr unterschiedliche Vertragsstrukturen gibt, die jeweils individuell untersucht und beachtet werden müssen.

Grundsätzlich lassen sich die Elektrizitätskosten in drei Preisbestandteile einteilen: Netznutzung, Energielieferung und Steuern/Abgaben. In allen drei Bestandteilen gibt es statische, leistungsabhängige und von der Wirkarbeit abhängige Preisbestandteile. Eine beispielhafte Zusammenstellung zeigt Abbildung 1.

Üblicherweise erfolgt die Verbrauchsmessung für den Fahrstrom in den UW auf der Mittelspannungsseite mittels registrierter Leistungsmessung (RLM). Dabei wird in einem festen 15-minütigen Messintervall ein Leistungsmittelwert gebildet. Die abrechnungsrelevante Leistungsspitze ist somit ein 15-min-Mittelwert. Der höchste so ermittelte Leistungsmittelwert,

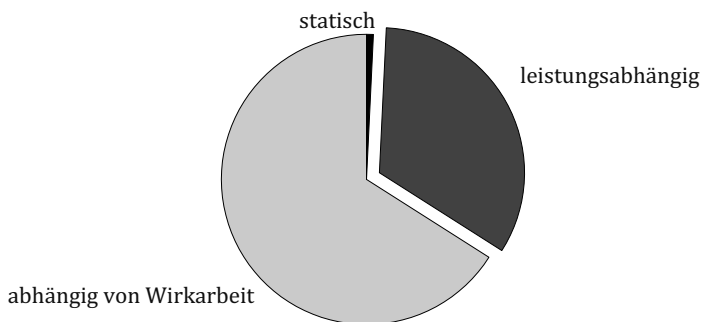


Abbildung 1: Anteile an den Elektrizitätskosten (Beispiel).

meist innerhalb eines Kalenderjahres, wird für die Berechnung des Elektrizitätspreises herangezogen.

In der Diskussion mit Nahverkehrsunternehmen wurden weitere Randbedingungen herausgestellt, die einen Einfluss auf die Bewertung des Leistungspreisanteils haben. Das Ermitteln der Elektrizitätskosten ist damit ein komplexes und aufwendiges Verfahren, bei dem der Wert der Leistungsspitze an mehreren Stellen einfließt.

Nach der Analyse der individuellen Randbedingungen eines Nahverkehrsunternehmens kann der Anteil der beeinflussbaren Leistungskostenbestandteile bestimmt werden. Unter Berücksichtigung des Potenzials zur Spitzensenkung kann abgeschätzt werden, ob eine Investitionsmaßnahme in GLAS sinnvoll ist. Weitere bei einer mit GLAS abgestimmten Störungslösung erzielbare Effekte, wie beispielsweise die Vermeidung niedriger Fahrleitungsspannung oder die Reduktion von Verlusten wurden nicht quantifiziert.

2.2 Prognose möglicher Einsparungen anhand gemessener UW-Leistungsgänge

Um mit wenigen Eingangsdaten eine erste und grobe Prognose über die Größe des Einsparpotenzials zu ermitteln, wurde ein Softwaretool erstellt, das in den Messwerten der UW der vergangenen Jahre nach den abrechnungsrelevanten Leistungsspitzen sucht und prognostiziert, um wie viel diese jeweils theoretisch hätten verringert werden können.

Das Prognosetool ermittelt die mögliche Veränderung der Leistungsspitze unter der Annahme des vollständigen Aufteilens der leistungsäquivalenten Energiemengen auf benachbarte Abrechnungsintervalle. Hierzu wird eine zeitbasierte Analyse der Häufigkeitsverteilung für die Viertelstundenleistung in zwei Szenarien durchgeführt. Im Szenario 1 wird nur ein benachbartes Abrechnungsintervall zum Ausgleich herangezogen. Im Szenario 2 werden das Intervall mit dem Maximalwert sowie beide benachbarte Abrechnungsintervalle gemittelt, um das maximal mögliche Einsparpotenzial zu ermitteln.

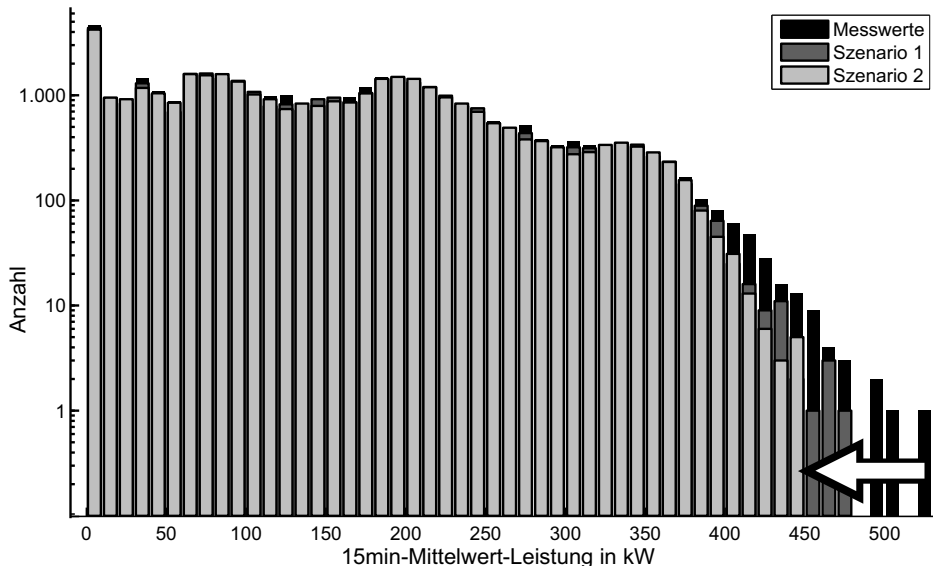


Abbildung 2: Histogramm des Leistungsmittelwerts eines UW.

Für die SVF sowie für ein weiteres mittelgroßes Nahverkehrsunternehmen wurde das Prognosetool erfolgreich angewendet. Als Beispiel für die graphische Ergebnisvisualisierung (Histogramm-Darstellung) wurde ein Unterwerk eines der beiden Unternehmen ausgewählt (Abbildung 2). Es wird deutlich, dass der für die Abrechnung relevante Maximalwert der Viertelstundenleistung im betrachteten Jahr genau einmal auftrat, die darauffolgenden, jeweils geringeren Leistungsspitzen ebenfalls nur ein- oder zweimal. Gelingt es mit GLAS, die in diesen vier Viertelstunden des Jahres auftretenden Energiemengen durch betriebliche Maßnahmen zumindest teilweise in die folgenden Viertelstunden zu verschieben, ergäbe sich ein Senkungspotenzial des maximalen Leistungsmittelwerts von bis zu 15 Prozent im Jahresverlauf. Im anderen untersuchten Verkehrsunternehmen ergab die Analyse der Unterwerksleistung für drei Unterwerke Leistungsspitzenenkungen von bis zu 24 Prozent.

3 Potenzialermittlung mit Betriebs- und elektrischer Netzsimulation

3.1 Auswahl des Simulationstools

Sind die im ersten Schritt vorgenommenen groben Abschätzungen zum Einsparpotenzial positiv für einen Einsatz von GLAS, erfolgt im zweiten Schritt eine genauere Potenzialermittlung über eine detaillierte, nicht echtzeitfähige Betriebs- und elektrische Netzsimulation mit typischen Störungsszenarien. Dazu ist ein leistungsfähiges und genaues Berechnungsprogramm für die elektrischen Vorgänge im Bahnstromversorgungsnetz erforderlich. Im

Rahmen des Projekts wurde die Simulationssoftware OpenTrack/OpenPowerNet (OT/OPN) [OT14; OPN14] verwendet, die durch Einbindung der Professur für Elektrische Bahnen der TU Dresden zur Verfügung stand. Diese Software hat ihre Leistungsfähigkeit bei verschiedenen Anwendungen bewiesen [Bag12; Ste08; VBZ14].

Für möglichst korrekte Simulationsergebnisse müssen alle Eingangsdaten, wie detaillierte Parameter von Strecke, Fahrzeug, Fahrplan, elektrischer Netzaufbau und Referenzen zwischen elektrischem Netz und Gleisnetz genau zur Verfügung stehen.

Im Rahmen des Projektes GLAS erfolgte dieser zweite Schritt mit Daten der SVF. Voruntersuchungen ergaben folgende Randbedingungen, die bei der Simulation des realen Netzes zu berücksichtigen waren:

- Störungen oder Änderungen zur Beeinflussung des Leistungsverlaufs pflanzen sich entlang der Linien fort und können auch in einem vom Störungsort entfernten UW leistungserhöhende und/oder verringernde Effekte hervorrufen. (Dieser Zusammenhang konnte auch an realen Messdaten eines anderen Betreibers im Abgleich mit dem Störungsbuch beobachtet werden.)
- Als Ergebnis verschiedener Störlösungsvarianten zeigte sich ein zusätzlich eingebrachter zeitlicher Versatz der Anfahrvorgänge als effektivste Methode hinsichtlich der Senkung der Leistungsspitzen. Größere dispositive Maßnahmen mit Zugausfällen brachten weiteres Senkungspotenzial.

Prinzipiell gilt damit für den zweiten Verfahrensschritt, dass für die Betrachtung der Störungslösung hinsichtlich eines leistungspreisbeeinflussenden Effekts stets der gesamte Linienverlauf einschließlich aller damit verbundenen Linien- und Netzverzweigungen, also das Gesamtnetz, zu betrachten und zu simulieren ist. Die erzielbare Wirkung hängt in starkem Maße von den Eigenheiten des jeweiligen Netzes und den individuellen Randbedingungen ab.

3.2 Simulation eines realen Netzes

Mit diesen prinzipiellen Erkenntnissen wurde das Linien- und elektrische Netz der SVF nachgebildet (Liniennetz siehe Abbildung 3).

Mit diesem Modell wurden verschiedene Szenarien einer Störung und dazu jeweils mehrere Varianten der Störungslösung simuliert. Als Beispiel sei hier eine Störung im Bereich Topfmarkt dargestellt. Die Störung erfasst ausschließlich die Linie 1 und die auf dieser Linie verkehrenden drei Fahrzeuge. Die Störung liegt im UW-Bereich 3. Andere Linien verkehren nicht in diesem UW-Bereich. Außerdem wird die Linie 1 in ihrem Linienverlauf aus den UW-Bereichen 1 und 2 versorgt (Abbildung 3).

In der Abbildung 4 ist die Entwicklung des 15-Minuten-Leistungsmittelwerts für die drei UW-Bereiche ab der ersten Viertelstunde (VS) nach Störungsbeginn dargestellt. Bereits zur fünften VS und damit eine Stunde nach Störungsbeginn sind keine Störungsauswirkungen mehr beobachtbar. In der Abbildung sind jeweils der ungestörte Betriebsfall (Nullfall), der



Abbildung 3: Schema der Infrastruktur des Straßenbahnnetzes Frankfurt (Oder).

Betriebsfall mit Störung jedoch ohne Eingriff bei der Störungsauflösung (Fahren auf Sicht im Bremswegabstand), der zeitliche Versatz der Anfahrvorgänge durch Verteilung der Anfahrten auf die Viertelstunden und der dispositive Eingriff (mit Kursausfall) gegenüber gestellt.

Im Vergleich zum Nullfall ist der Einbruch des Leistungswerts in der 1. VS aufgrund der Störung und dem einhergehenden Ausfall von Fahrten erkennbar. Ebenso ist der Mehrbedarf im UW 3 in der 2. VS und 4. VS sowie im UW 2 in der 3. VS zu erkennen. Dies ist in der Bewegung des Fahrzeugpulk begründet, der sich im Fall „ohne Eingriff“ erst über die planmäßig vorgesehenen Wendezeiten in den Linienendpunkten abbaut. Die Erhöhung der Leistungsmittelwerte aufgrund der Störung und Auflösung ohne Eingriff ist in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Erhöhung des maximalen 15-Minuten-Leistungsmittelwerts aufgrund der Störung „Topfmarkt“.

UW	max. 15-Minuten-Leistungsmittelwert vor Störung in kW	max. 15-Minuten-Leistungsmittelwert nach Störung in kW	Erhöhung in %
1	171	172	0
2	111	140	26
3	70	85	21

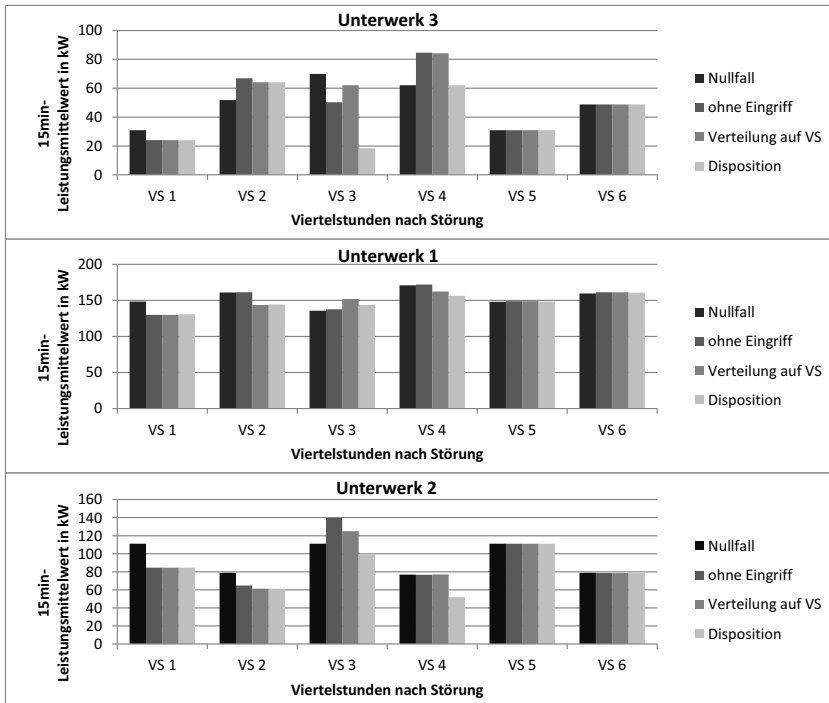


Abbildung 4: 15-Minuten-Leistungsmittelwert für ausgewählte UW bei Störung „Topfmarkt“.

Weiterhin ist in der Abbildung 4 ersichtlich, dass eine Verteilung der Abfahrten auf die Viertelstunden für die Beispielstrecke ein probates Störungsauflösungsszenario darstellt. Für das Gesamtnetz Frankfurt (Oder) und die Störung „Topfmarkt“ werden Reduktionen in den UW 1 und UW 2 erreicht, im UW 3 kann der Abrechnungswert durch diese Maßnahme nicht gesenkt werden. Lediglich der dispositive Eingriff (mit Kursausfall) hat aufgrund der entfallenden Fahrzeugbewegungen eine durchgehend signifikante Senkung des Leistungsmittelwerts zur Folge. In der Tabelle 2 sind die entsprechenden Werte für alle drei UW zusammengestellt.

Tabelle 2: Senkung des maximalen 15-Minuten-Leistungsmittelwerts bei der Störung „Topfmarkt“ aufgrund von Eingriffen bei der Störungsauflösung; jeweils bezogen auf die Auflösung ohne Eingriff.

UW	Senkung durch Verteilung auf VS in %	Senkung durch Disposition in %
1	6	9
2	11	20
3	0	24

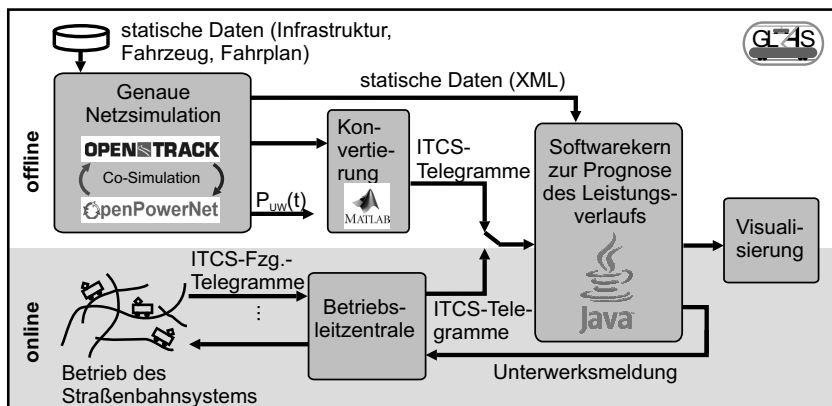


Abbildung 5: Schema zum Aufbau der GLAS-Software.

Dieses Beispiel zeigt, dass bei optimaler Disposition die maßgebende Leistungsspitze um bis zu 24 Prozent gesenkt werden kann. Schon eine einfache Verteilung der Fahrten auf die nächste Viertelstunde bringt bis zu elf Prozent Leistungsspitzensenkung.

4 Potenzialermittlung mit Betriebs- und elektrischer Netzsimulation

Da die Simulation mit OT/OPN nicht echtzeitfähig ist, wurde mittels Ersatzmethoden eine Berechnungsmöglichkeit geschaffen, die im Echtzeitbetrieb die Prognose des Leistungsverlaufs unter vereinfachten Bedingungen ermöglicht. Weiterhin sollte die Möglichkeit geschaffen werden, mit den Daten aus der Simulation den Softwarekern zur Prognose des Leistungsverlaufs in Echtzeit betreiben und somit unabhängig vom tatsächlichen Betriebsgeschehen Szenarien analysieren zu können.

Die dafür entwickelte Software wird als GLAS-Softwarekern bezeichnet. Um den Kern herum sind verschiedene Module gruppiert, über die nachfolgend ein Überblick gegeben wird.

4.1 Aufbau der GLAS-Software

Die Module der GLAS-Software sind über Datenschnittstellen miteinander verbunden (Abbildung 5). Für einen einfachen Datenaustausch erwies sich eine Datenstruktur gemäß railML-Format [RML14] mit einigen Erweiterungen als besonders vorteilhaft. Für den Offlinebetrieb wurden diese Schemen um Tags für die Störungsszenarien erweitert.

Am Anfang eines jeden Anwendungsfalles sind die statischen Daten der Infrastruktur des Liniennetzes, der Fahrzeuge und des Fahrplans zu übernehmen beziehungsweise zu erfassen.

Im GLAS-Softwarekern erfolgen die Simulation, Optimierung und Bewertung der Daten. Wie in Abbildung 5 zu sehen, kann dieser sowohl für den Offline- als auch für den

Onlinebetrieb verwendet werden. Basisdaten des Softwarekerns sind stets die zeitbezogenen ITCS-Fahrzeugstandorte. Im Offlinebetrieb werden diese Daten, zum Beispiel für detaillierte Potenzialabschätzungen mit OT/OPN erzeugt und mittels Konvertierungstool aufbereitet. Im Onlinebetrieb werden die aktuellen Positionsdaten der Fahrzeuge aus den ITCS-Daten des Fachdienstpaars AUS und REF-AUS gemäß der Standards VDV 453/4 ermittelt.

Der GLAS-Softwarekern berechnet die Prognosen der 15-min-Leistungsmittelwerte aller UW und bei Störungen im Betriebsablauf alternative Wiederanlaufstrategien mit entsprechenden Leistungsverlaufsprognosen. Weitere Module der GLAS-Software dienen der Darstellung der Leistungsmittelwerte aller UW in tabellarischer Form, sowie als Hilfen für die Disposition.

4.2 Arbeitsweise der GLAS-Software

Automatisierte Erkennung von Störungen im Betriebsablauf

Das System GLAS dient unter anderem der Vermeidung von Leistungsspitzen beim Wiederanlauf des Betriebs nach Störungen. Dazu muss eine Störung automatisch identifiziert werden. Dabei besteht die Schwierigkeit, aus den aktuellen Fahrzeugpositionen eine Entscheidung über das Vorliegen einer Störung zu treffen. Dafür wurde eine Logik entworfen, die aus der Abfolge der Positionen eines Fahrzeugs die Bewegung desselben analysiert und ein „Nichtbewegen“ des Fahrzeugs nach einer gewissen Zeit als Störung interpretiert.

Die Entscheidung kann zusätzlich mit der aktuellen Fahrplanlage verknüpft oder um besondere Fahrplansituationen, wie beispielweise längere geplante Halte an Zentralhaltestellen, erweitert werden.

Generieren von Störungsauflösungsszenarien

Wurde im Betrieb eine Störung erkannt, ermittelt ein Algorithmus die betroffenen Fahrzeuge mit ihrer Richtung und Reihenfolge. Anschließend können (analog der Darstellung bei der Offline-Simulation) automatisch verschiedene Wiederanfahrtsszenarien der Fahrzeuge mit unterschiedlichem zeitlichen Versatz vorausberechnet werden.

Diese Szenarien werden in den folgenden Schritten um zugehörige Leistungsverläufe ergänzt und bewertet.

Prognose der Leistungsbelastung in Echtzeit

Die statischen Daten stehen dem GLAS-Softwarekern aus einer Datenbank zur Verfügung. Die Berechnung der Fahrdynamik ermittelt einen Sollverlauf aller Fahrzeugbewegungen (Zeit-Weg- und Zeit-Geschwindigkeit-Verlauf).

Aus den Bewegungen werden Sollverläufe der Leistungsaufnahme und -abgabe eines jeden Fahrzeugs für einen Prognosehorizont ermittelt. Diese Leistungsverläufe werden unter exakter Berücksichtigung der Versorgungsgrenzen den jeweiligen Unterwerken zugeordnet. Die anteiligen Leistungsverläufe in den Unterwerken werden anschließend zur Gesamt-

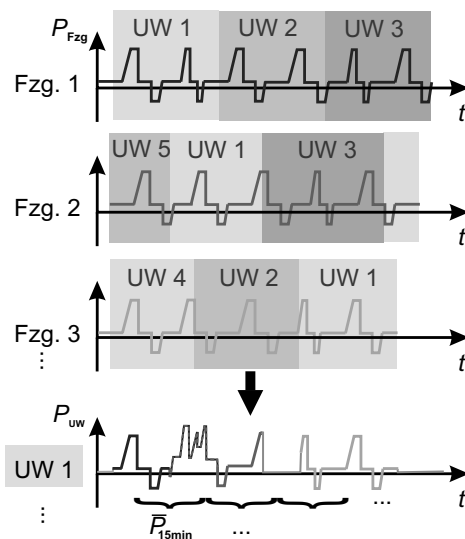


Abbildung 6: Prinzipdarstellung zur Zusammensetzung der Unterwerksleistungen.

Unterwerksleistung zusammengefasst. Dabei werden, wie in der Realität, ausgleichende Leistungsflüsse über die Unterwerk-Sammelschiene automatisch berücksichtigt (Abbildung 6).

Während der Laufzeit werden der Bewegungs- und der Leistungsverlauf der Fahrzeuge im Softwarekern anhand der aus der Betriebsleitstelle eintreffenden Meldungen kontinuierlich aktualisiert. Eine Erhöhung der Verspätung um beispielsweise fünf Sekunden bewirkt eine Verschiebung des Leistungsprofils um diese Zeiteinheit (Abbildung 7). Unmittelbar im Anschluss an die Aktualisierung der Fahrzeugleistungsaufnahme erfolgt eine Aktualisierung der entsprechenden Anteile in allen betroffenen Unterwerken. Ist diese Aktualisierung abgeschlossen, werden die 15-min-Leistungsmittelwerte neu berechnet.

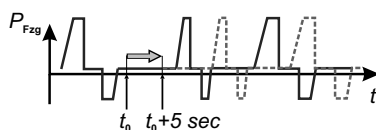


Abbildung 7: Prinzipskizze zur Modifizierung des Leistungsverlaufs bei Eintreffen eines ITCS-Telegramms mit Erhöhung der Fahrplanlage um fünf Sekunden.

Bei Auftreten einer Störung werden die Störauflösungsszenarien hinsichtlich der sich ergebenden Leistungsverläufe analog zu diesem Verfahren berechnet. Dies erfolgt in Echtzeit, sodass zum Störungsende stets eine Aussage zu den erwarteten Leistungsmaxima der verschiedenen Lösungsszenarien vorliegt.

GLAS – Störungserkennung – 10:50:00								
Linie	Kurs	von	nach	Entfernung von Hst in m	Fahrplanlage in sec.	Zeitpunkt des letzten Telegramms	Standzeit in sec.	Störungsflag
1	102	Magistrale	Topfmarkt	155.0	205	10:49:56	398	2
1	202	Topfmarkt	Magistrale	160.0	1103	10:49:49	1269	2
1	203	Klingestrasse	Topfmarkt	125.0	8	10:49:51	8	0
2	302	Witzlebenstrasse	Gerhart-Hauptmann-Stra...	387.0	0	10:49:42	17	0
2	403	Kiessingplatz	Kantstrasse	0.0	0	10:49:46	13	0
3	503	Bahnhof	Dresdener Platz	288.0	0	10:49:44	63	0
3	602	Dresdener Platz	Bahnhof	279.0	0	10:49:58	26	0
4	702	Conergy SolarModule	Technologiepark	2.0	47	10:49:54	54	0
4	703	Stadion	Anger	0.0	0	10:49:36	47	0
4	802	Conergy SolarModule	Gartenstadt	315.0	76	10:49:38	21	0
5	902	Bahnhof	Kleist Forum	0.0	0	10:49:35	24	0

Abbildung 8: Betriebslage und Störungserkennung als tabellarische Übersicht.

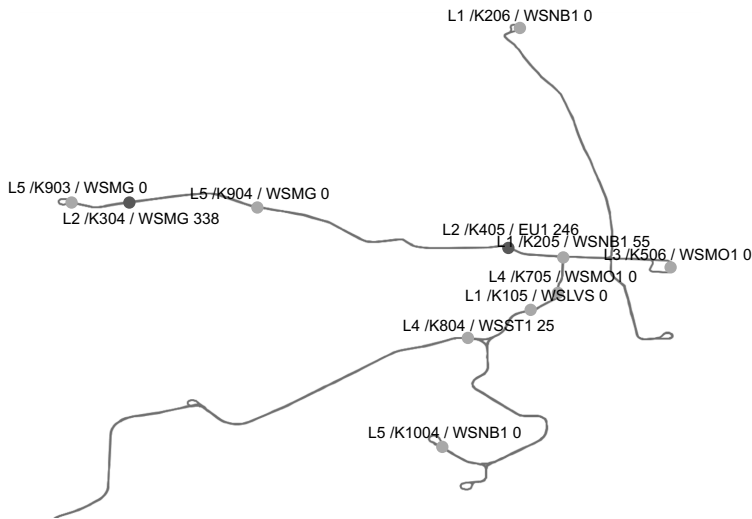


Abbildung 9: Betriebslagevisualisierung in einer Netzdarstellung.

Szenarienbewertung

Die berechneten Leistungsmaxima der verschiedenen Störauflösungsszenarien werden im Sinne des Projektes so bewertet, dass die beste Wertung ein Szenario erhält, welches über den gesamten Betrachtungshorizont den geringsten Wert der maximalen 15-Minuten-Leistungsmittelwerte liefert. Sollte es bei der Einbeziehung mehrerer UW in die Bewertung zu konkurrierenden Szenarien kommen, müssen zusätzliche Kriterien gemäß der Elektrizitätskostenberechnung berücksichtigt werden.

Für die Anwendung ist zu berücksichtigen, dass sich die Betriebslage weiterentwickelt und damit die Szenarienbewertungen mit fortschreitender Zeit aktualisiert werden müssen.

Visualisierung und Fahrempfehlung

In der Betriebsleitstelle (ITCS-Zentrale) erfolgt durch die GLAS-Software eine Visualisierung der Betriebslage als tabellarische Übersicht und in einer Netzgraphik (Abbildung 8 und 9).

GLAS - Leistungsmeldungen									
Startseite									
Fahrzeugmeldungen									
Leistungsmeldungen									
Disponierte Maßnahmen									
WSDL									
25.11.2013 16:53:22,622		25.11.2013 16:45:00,000 - 25.11.2013 17:00:00,000		25.11.2013 17:00:00,000 - 25.11.2013 17:15:00,000		25.11.2013 17:15:00,000 - 25.11.2013 17:30:00,000		25.11.2013 17:30:00,000 - 25.11.2013 17:45:00,000	
Maßnahmen		Ist Werte		Ist Werte		Ist Werte		Ist Werte	
Unterwerk		Leistungsmittelwert in Watt		Leistungsmittelwert in Watt		Leistungsmittelwert in Watt		Leistungsmittelwert in Watt	
3	40169,917	3	68489,890	3	56725,732	3	40117,554	3	40117,554
1	158837,768	1	127823,000	1	138769,922	1	158397,004	1	158397,004
2	93276,952	2	90732,674	2	82271,239	2	61739,912	2	61739,912
4	107895,498	4	134757,812	4	125603,751	4	100729,998	4	100729,998
7	90641,833	7	70602,080	7	109489,639	7	116419,043	7	116419,043
6	90333,793	6	111960,169	6	96438,710	6	90436,187	6	90436,187
10	0,000	10	0,000	10	0,000	10	0,000	10	0,000
Prognose für Maßnahmgruppe 1		Prognose für Maßnahmgruppe 1		Prognose für Maßnahmgruppe 1		Prognose für Maßnahmgruppe 1		Prognose für Maßnahmgruppe 1	
Unterwerk		Leistungsmittelwert in Watt		Leistungsmittelwert in Watt		Leistungsmittelwert in Watt		Leistungsmittelwert in Watt	
3	40169,917	3	68489,890	3	56725,732	3	40117,554	3	40117,554
1	158363,629	1	129320,804	1	138769,922	1	158397,004	1	158397,004
2	97838,887	2	91642,576	2	82271,239	2	61739,912	2	61739,912
4	107895,498	4	134757,812	4	125603,751	4	100729,998	4	100729,998
7	90641,833	7	70602,080	7	109489,639	7	116419,043	7	116419,043
6	90479,169	6	111960,169	6	96438,710	6	90436,187	6	90436,187
10	0,000	10	0,000	10	0,000	10	0,000	10	0,000
Maßnahmgruppe 1		Maßnahmgruppe 1		Maßnahmgruppe 1		Maßnahmgruppe 1		Maßnahmgruppe 1	
Kurs	Verzögerung	Kurs	Verzögerung	Kurs	Verzögerung	Kurs	Verzögerung	Kurs	Verzögerung
399	6	399	6	399	6	399	6	399	6
1150	16	1150	16	1150	16	1150	16	1150	16
1553	26	1553	26	1553	26	1553	26	1553	26
1962	36	1962	36	1962	36	1962	36	1962	36
Disponieren		Disponieren		Disponieren		Disponieren		Disponieren	

© 2013 ASCI Systemhaus GmbH

Abbildung 10: Übersicht der Unterwerksleistungsmittelwerte für den Disponenten.

Die abrechnungsrelevanten Leistungsspitzen, also die 15-min-Mittelwerte der Leistungen in jedem Unterwerk, werden für einen Prognosehorizont zusammengestellt (Abbildung 10). Gleichzeitig erfolgt im Störfall die Visualisierung der Leistungsprognose der Störauflösungsszenarien.

Der Disponent kann sich dann für die Umsetzung eines Szenarios entscheiden. Die mit diesem Szenario verknüpfte Anfahrtsstaffelung wird auf die entsprechenden Fahrzeuge übertragen und den Fahrern in Form einer Assistenzfunktion visualisiert.

4.3 Fallstudie

Für die oben bereits vorgestellte Störung im Bereich Topfmarkt im Netz der SVF wurde mittels GLAS-Software eine Reduktion der abrechnungsrelevanten Leistungsspitze (15-min-Leistungsmittelwert) von knapp 72 kW ohne Eingriff auf knapp 52 kW bei Einsatz des Systems GLAS ermittelt. In diesem Unterwerk ist somit durch GLAS eine Reduktion um 27 Prozent zu verzeichnen.

Im benachbarten Unterwerk 1 wird ebenfalls eine Senkung durch das System GLAS erreicht, die allerdings mit einer Reduktion um gut sechs Prozent nicht so hoch ausfällt, wie im UW 3. Insgesamt wird eingeschätzt, dass im Mittel eine Senkung der Leistungsspitzen um etwa zehn Prozent möglich ist.

5 Testaufbau zur Demonstration der Funktionalität

Im Rahmen des Projekts wurde die entwickelte Software in einer Laborumgebung intensiv getestet. Für eine Überführung in eine Echtzeitanwendung mit realen Daten des Praxispartners musste einerseits ein Zugriff auf die ITCS-Telegramme des Praxispartners hergestellt werden und andererseits war eine Schnittstelle für das Rücksenden der automatisch generierten Abfahrt- und Fahrempfehlungen über die Leitzentrale an die Fahrzeugführer nötig [Leh14].

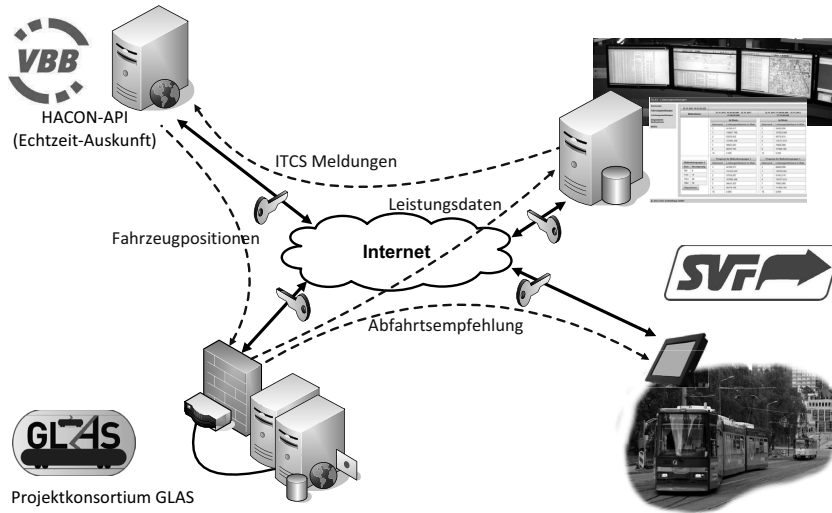


Abbildung 11: Konzept des Demonstrators bei der SVF.

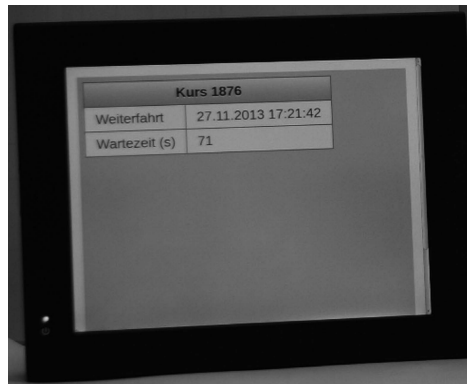
Bei beiden Voraussetzungen stießen die Projektpartner an Grenzen. Somit wurde ein konzeptionell geänderter Demonstrator zum Nachweis der Funktion des Systems GLAS entwickelt und als verteilte Webanwendung mit der SVF realisiert (Abbildung 11).

Für den Demonstrator wurde ein Datenmodell zur Speicherung stationärer und dynamischer Daten konzipiert. Als Datenbank fand PostgreSQL Anwendung. Aufgrund der Nicht-Verfügbarkeit der Datendienste REF-AUS und AUS erfolgte eine Änderung bei der Datenhaltung für den Demonstrator. Die stationären Daten wurden mit einer Schnittstelle nach VDV 452 in die Datenbank importiert. Zusätzlich wurden einige Daten, wie etwa Fahrzeugdaten, manuell erfasst und gespeichert. Die Daten über die aktuelle Fahrplanlage der Fahrzeuge konnten über die Hacon-Echtzeit-API von einem Web-Server des Verkehrsverbundes Berlin/Brandenburg abgefragt und ebenfalls in der Datenbank gespeichert werden [VBB13; HAF13]. Die dynamischen Daten wurden danach entsprechend dem ursprünglichen Konzept umgesetzt und dem GLAS-Softwarekern zur Verfügung gestellt.

Die vom Softwarekern berechneten Ergebnisse (Leistungswerte, Fahrtempfehlungen) flossen in die Datenbank zurück. Zusätzlich wurden die Leistungswerte über ein Browser-Interface dem Disponenten visualisiert (Abbildung 10).

Die Nutzung eines vorhandenen Informationskanals zwischen ITCS des Praxispartners und den Fahrzeugbordrechnern für die Übertragung der Fahrtempfehlungen gestaltete sich ebenfalls problematisch. Innerhalb des Demonstrators wurde deshalb ein zusätzlicher Fahrzeugrechner ausgerüstet, der mittels GSM die Fahrtempfehlungen empfängt. Die zu visualisierenden Abfahrtszeiten werden umgerechnet und als Countdown dem Fahrer angezeigt (Abbildung 12).

Die prinzipielle Wirkungsweise des Systems GLAS konnte damit erfolgreich demonstriert werden.



Kurs 1876	
Weiterfahrt	27.11.2013 17:21:42
Wartezeit (s)	71

Abbildung 12: Fahrzeugrechner des Testaufbaus.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Beitrag wurde ein System vorgestellt, das Leistungsspitzen bei der Energieversorgung von Gleichstrombahnen durch ein pro-aktives Verfahren entzerrt, indem es beispielsweise nach Störungen das gleichzeitige Anfahren von Fahrzeugen mit betrieblichen Mitteln vermeidet. Die erzielbare Senkung der Elektrizitätskosten hängt wesentlich von der individuellen Kostenstruktur ab. In jedem Fall wird das Auftreten von kurzen Leistungsspitzen verringert und damit auch die Gefahr zusätzlicher Störungen durch Spannungsabfälle reduziert.

Wichtige Eingangsdaten stellen die Fahrzeugpositionsdaten aus dem Leitsystem des Nahverkehrsbetriebs da. Für die Umsetzung müssen offene Schnittstellen zum ITCS frei nutzbar sein.

Eine prototypische Demonstration bei einem Nahverkehrsbetreiber mit wissenschaftlicher Begleitung steht derzeit noch aus. Eine Einbindung von weiteren Verbrauchern (zum Beispiel über das Fahrleitungsnetz gespeiste Weichenheizungen) wäre dann mit zu berücksichtigen, da daraus eine weitere Verbesserung der Wirkung des Systems GLAS zu erwarten ist.

Als weitere Ausbaustufe des Systems wäre denkbar, in das Verfahren auch Daten von Lichtsignalanlagen (LSA), insbesondere bei Unterstützung des OCIT-Standards durch die LSA einzubinden und diese zur intermodalen und qualitätsgerechten LSA-Steuerung und abgestimmter Fahrerassistenz zu nutzen [Gas14]. Auch andersherum ist die Berücksichtigung der Leistungsspitze in einer kooperativen LSA-Steuerung möglich. Weiterhin wäre die Einbindung von Leistungsgangdaten aus den Unterwerksleitzentralen für das System vorteilhaft.

Danksagung

Die Untersuchungen im Projekt GLAS wurden von der Stadtverkehrsgesellschaft Frankfurt (Oder), namentlich durch den Geschäftsbereichsleiter Technik Herrn Huwe sowie seinen Mitarbeitern, insbesondere den Herren Krüger, Kube, Jachning und Kuke aus Anwendersicht

maßgeblich begleitet. Die Autoren bedanken sich herzlich für diese Unterstützung. Das Projekt GLAS wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie als Kooperationsprojekt im Rahmen des Förderprogramms Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) gefördert.

Literaturverzeichnis

- [Bag12] T. BAGNALL, I. IMRIE und M. JACOB: „Queensland Rail’s proof of concept for OpenPowerNet“. In: *Elektrische Bahnen* 110.8-9 (2012), Seiten 20–26.
- [Gas14] C. GASSEL, B. SCHÖNHERR, T. MATSCHEK und J. KRIMMLING: „Steigerung der ÖPNV-Qualität durch kooperative Ampelanlagen - Erfolgreiches Modellprojekt in Dresden mit den ersten Fahrerassistenzsystemen für Straßenbahnen“. In: *Der Nahverkehr* 5 (2014), Seiten 20–25.
- [HAF13] *Open VBB HAFAS API Dokumentation*. 2013. URL: <https://github.com/mphasize/vbb-hafasdocs/blob/master/API.md> (besucht am 14. 11. 2013).
- [Leh14] M. LEHNERT, T. ALBRECHT, L. LANGERWISCH und S. KÖRNER: „Vermeidung von Leistungsspitzen bei Straßenbahnen durch Echtzeit-Verkehrsmanagement“. In: *24. Verkehrswissenschaftliche Tage*. Dresden, 20.–21. März 2014.
- [OPN14] *OpenPowerNet Webseite*. 2014. URL: <http://openpowernet.de> (besucht am 05. 10. 2014).
- [OT14] *Open Track Webseite*. 2014. URL: http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_d/opentrack_d.html (besucht am 05. 10. 2014).
- [RML14] *railML Webseite*. 2014. URL: <http://www.railml.org> (besucht am 05. 10. 2014).
- [Ste08] A. STEPHAN: „OpenPowerNet - Simulation of Railway Power Supply Systems“. In: *IT08.RAIL OpenTrack Userworkshop 2008*. Zürich, 24. Jan. 2008.
- [VBB13] *Schnittstellen für Webentwickler und Webservices*. 2013. URL: <http://www.vbb.de/de/article/webservices/schnittstellen-fuer-webentwickler/5070.html> (besucht am 14. 11. 2013).
- [VBZ14] *Referenzschreiben*. 2014. URL: http://www.openpowernet.de/downloads/Reference_VBZ_de.pdf (besucht am 05. 10. 2014).

Korrespondierender Autor: Martin Lehnert, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Telefon: +49 351 463-42536, E-Mail: martin.lehnert@tu-dresden.de

ON-TIME – A framework for integrated railway network operation management

Thomas Albrecht¹, Meena Dasigi²

¹ Technische Universität Dresden

² NetworkRail

This paper has been published in 5th conference Transport Research Arena: TRA 2014 Proceedings, Paris, 14.–17. April 2014, URL: <http://tra2014.traconference.eu/papers/html/index.html>.

Abstract

Railway traffic management today is mainly performed by human controllers according to national rules. Traffic Control Systems which are mainly used to manage data coming from the field are expensive and have proprietary interfaces. Under these circumstances, managing cross-border traffic and dealing with future increases in capacity demand represent difficult challenges for railway operators.

In the project ON-TIME (Optimal Networks for Train Integration Management across Europe) funded under the 7th Framework Programme of the European Union, railway infrastructure managers, railway technology developing industry and academic institutions strive to regard the process of railway traffic management in a holistic way in order to meet these challenges.

The paper presents the overall approach of the project and presents in detail the approaches on real-time perturbation management and real-time train speed regulation.

Keywords: Railway Traffic Management; Traffic Control Systems; Driver Advisory Systems

Nomenclature

CU	Central unit
IM	Infrastructure manager
OBU	On-board unit
RTTP	Real-time traffic plan
RU	Railway undertaking
TCS	Traffic Control System (The part of a Traffic Management System responsible for data collection and execution of control commands in the field)
TMS	Traffic Management System

1 Introduction

1.1 Motivation and Fundamental Principles

The European railway network will face growing traffic demand in the next years, encouraged by the European commission's will to shift important parts of freight and passenger traffic to this eco-friendly transport mode [Com11]. Existing bottlenecks in the network will impact more negatively on traffic quality and new capacity bottlenecks are expected to occur and persist. At the same time, expectations of railway customers (passengers and freight) are growing as well, they expect shorter travel times and higher system reliability. These challenges can only be met at the short and medium term by innovative traffic management solutions.

For many years, algorithms for real-time conflict detection and resolution have been described in the scientific literature, see e.g. [Cor13] for a review. But only recently have these algorithms been able to solve problem instances of practical relevance in real-time. They are however still not applied in daily operation in large railway networks for two main reasons:

1. The benefit of the algorithms is difficult to predict.
2. Operational traffic control systems (TCSs) as currently in operation at the nationally acting railway infrastructure managers are not easy to extend.

The main goal of the project ON-TIME (Optimal Networks for Train Integration Management across Europe) partially funded by the European Commission is an increase of the capacity in the railway networks through an integrated approach to railway operation optimisation [Rob13]. The project is driven by the railway infrastructure managers (IM) from the United Kingdom (NetworkRail), Italy (RFI), Germany (DB Netz), France (RFF) and Sweden (Trafikverket), supported by 14 partners from academia and industry. The project goal shall be reached by defining and testing a flexible system design for railway traffic management based on extensible interfaces. That shall lead to a system design, where hardware equipment installed on the track-side remains usable for long periods of time, but software optimisation components and hardware used for non-safe calculations as traffic management can easily be exchanged and extended depending on the current and future state of the art. This shall reduce the risk of investments into monolithic products with long product lifetimes.

A set of principles have been defined at the start of the project (see project website [ONT13]) to guide the development process, among those are:

- By managing railway traffic more efficiently, it is possible to increase the capacity of the railway
- Trains can operate with reduced headways if the effect of a single perturbed train can be mitigated so as to not cause a knock-on or ripple effect on other trains
- Instructing drivers to vary train speeds will allow traffic managers to manage the separation between trains and so increase the used capacity of the infrastructure.

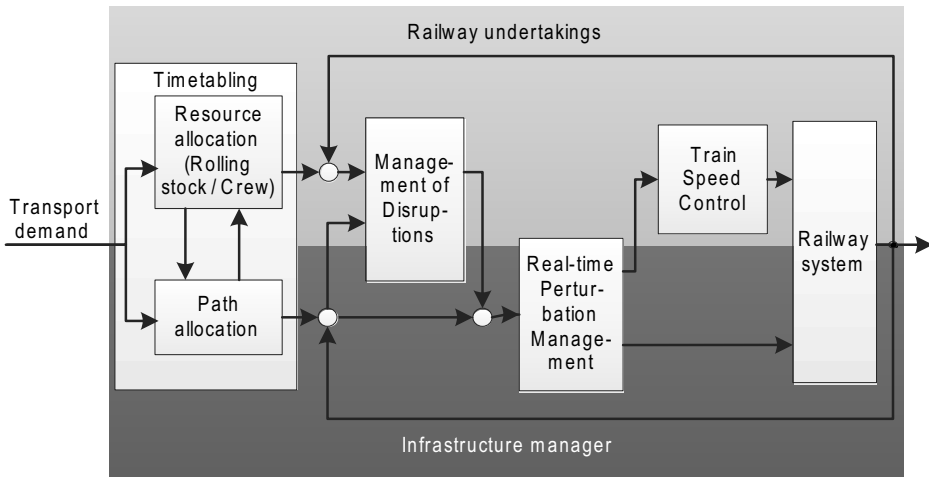


Figure 1: Project approach as control loop.

- Ontime will study the management of railway disruption in two major subsets:
 - Those that can be resolved through correction by an ICT system with no human intervention. IM/RU communication will be between systems.
 - Those that can only be resolved with human intervention to make decisions about the redistribution of assets (paths, crew, rolling stock). These decisions will need RU/IM communication both human and system which will be only supported by an ICT system.
- Train re-planning will be both:
 - Event driven (e.g. track blockage, power supply not working)
 - Clock driven (e.g. small perturbations: cyclic delay update)

1.2 Railway Control Loop

The project guidelines can best be understood if railway operation is described as nested (cascading) control loop, as can be seen from Figure 1. In that figure, different control levels of railway operation are given as white rectangular blocks, the background color of the figure indicates which of the major players - Infrastructure manager (IM) or Railway Undertaking (RU) - are involved in the respective control task.

Driven by the transport demand for both passengers and freight, railway undertakings determine the demand of train paths and plan the usage of rolling stock. The infrastructure manager allocates paths in such a way, that demands are fulfilled in the best possible way for the railway undertakings and no conflicting paths are provided, i.e. the timetable should be conflict-free and feasible in practice [Gov13]. The timetabling demand is seen as starting point of all operation measures. The project tackles in particular the problem of different

planning horizons: Today, timetabling starts more than a year before the actual operation. Changes in demand – in particular for freight traffic – require significant re-planning effort. Within the project it will be assumed, that passenger traffic will need to be planned a long time in advance (at least three months to allow seat reservation). Regular train headways are preferred for passenger trains in order to facilitate access for the passengers. On the other hand, freight traffic has very short planning horizons (less than a week), train departure times do not need to be cyclic. The project aims at defining timetabling tools and processes, which can fulfil both requirements and create a feasible and robust timetable which is resilient to delays when executed in real operation with active traffic management.

For managing traffic in real-time, the technical state of the infrastructure and vehicles must be monitored to detect faults or failures which might impact the control options. Furthermore, the traffic state (train positions and speeds) as captured by trackside and onboard sensors must be detected and continuously compared with the timetable in order to identify deviations.

Once deviations are detected, different control measures can be applied to get back to the normal state. They can be categorized according to the degree of involvement of the railway undertakings (RU):

RU must be involved, e.g. if planned commercial stops cannot be reached due to track blockage, if trains shall be deviated over diversionary routes (where it is not sure that drivers have route knowledge). These measures are usually only taken in case of large disruptions and must thus be considered in close cooperation between RU and IM, which is illustrated in Figure 1. These problems and solution processes also frequently require the active involvement of human experts. This process results in a set of (modified) rolling stock or crew constraints as well as the (modified) commercial timetable, where the commercial stops for each train and the lines the train shall take are listed.

There are other measures, which don't require any intervention of the RU, these are e.g. re-routing of trains in stations or on parallel tracks, re-timing of departures and arrivals at stations, re-ordering of trains at junctions or in stations, cancelling or adding non-commercial stops, e.g. for overtaking purpose. These measures are performed frequently, even in case of slight delays and shall be summarized under the term "Perturbation management". Actions taken here are manifold and might be needed with high frequency. Therefore, methods and algorithms must be developed which are able to work without human involvement. An important prerequisite for a successful introduction of this kind of system is a high level of automation of the route setting process as part of the underlying Traffic Control System.

Furthermore, traffic fluidity can be improved by controlling the speed of trains in such a way, that their distance corresponds to the optimal value through system bottlenecks, i.e. that stops due to red signals protecting other trains shall be prevented. This control measure requires input from the IM side – which must be provided automatically depending on the result of the perturbation management process. However, this must be implemented by the train driver belonging to the RU, e.g. with the help of driver advisory systems, or by Automatic Train Operation (ATO) systems.

In passenger railways in particular, occurring delays require active connection management in order to determine whether connections must be held or can be broken [Dol14]) This might be handled by the RU, in collaboration between RU and IM or by the IM, depending on the traffic structure in a network.

1.3 Structure of the Paper

The paper presents in detail the part of the framework dealing with the management of small perturbations in Section 2 and the approach chosen for speed control by Driver Advisory Systems (DAS) in Section 3. The focus of the description will be on the interfaces between different functions and systems which are proposed in the project ON-TIME in order to enable seamless integration of different algorithms into traffic control systems of different suppliers. Section 4 explains the approach for validation of the project results.

2 Real-time perturbation management

2.1 Important data structures

In order to get a clear understanding of the interaction of functional modules, some terms are defined first.

Traffic state: In control theory the state of a system is defined as the set of variables which is sufficient to predict future system behavior, if all external input variables are known. To predict the future behavior of a complex railway system, first of all current train positions must be known. Train speed as an additional state variable can be measured directly or derived from the progress of position over time. There are further factors (state variables) which need to be known for a good system behavior prediction, e.g. mass of freight trains, technical state of power supply or ATP systems. Other factors like occupation of passenger trains or weather circumstances might have a smaller influence on the future traffic behavior and thus only be considered in exceptional cases in order not to overcomplicate the system models used in standard operation management.

The *Real-Time Traffic Plan* (RTTP) is a microscopic representation of the timetable planned in a short term horizon (real-time). It consists of a routing, timing and a stopping part for each train. The routing/timing part describes the sequence of track vacancy detection sections a train passes along its run together with its planned occupation and release times. This description has been chosen, because most available algorithms for track conflict detection and resolution work with such a sectional representation of the infrastructure [Che10; Cor13; Pel13], and they are also important e.g. when blocking time diagrams or time-distance-graphs shall be displayed for human dispatchers. The stopping part of the RTTP describes, on which of these sections, where exactly (along the section) and when the train will stop (be it a commercial stop or an operational stop, e.g. to permit overtaking).

From the above described train view of the RTTP, the infrastructure view can be generated, i.e. the sequence of trains which will pass a certain track section and when this is expected

to happen. From this so-called infrastructure view of the RTTP, the sequence in which the routes are to be set can be determined by the Traffic Control System.

A *train path envelope* is used to describe the time windows [Alb12] along a train run, within which a train can move without getting additionally hampered by the signaling system, e.g. due to train following or crossing conflicts. Time windows can be defined along the train run for any signal passing point (usually conditions of the kind “earliest suggested passing time”) or track vacancy detection section release point (usually conditions of the kind “latest permitted passing time”). Further time windows can be defined around station arrival and departure times.

2.2 Important functions and their interaction

The Perturbation Management Module (PMM) can be divided in four main sub-modules that allow to effectively manage traffic in real-time when disturbances are observed in the network.

The first sub-module is the so-called Traffic State Monitoring (TSM) which is responsible for monitoring current traffic conditions by collecting via track-side and train-side sensors, all the information relative to both the traffic and the infrastructure. This sub-module runs continuously in order to provide the current traffic state and/or the traffic state history each time that this is requested by the other modules, e.g. the conflict detection and resolution module or the HMI.

The second sub-module is called Conflict Detection and Resolution (CDR) and represents the most important part of the PMM. Its components and their interaction are illustrated as simplified SysML activity diagram in Figure 2. In the project, an integrated approach of solving track occupation and connection conflicts is proposed, however in this paper, the focus shall be exclusively set to track conflicts. The execution of this sub-module first involves a call to the Traffic State Prediction function which forecasts the state evolution of both traffic (e.g. train positions and speeds) and infrastructure (e.g. route settings, signal aspects, switch positions) within a certain time period ahead named “prediction horizon”. For this prediction, the last computed order/routing part of the RTTP and the current traffic state as well as further constraints (crew, rolling stock, connection constraints) are used as input. Based on this prediction, the Track Conflict Detection function is activated to identify the presence of potential track occupation conflicts, i.e. multiple trains trying to use one of the infrastructure resources (track detection sections) at the same time. If conflicts exist, the Track Conflict Resolution function is executed, which computes a new Real-Time Traffic Plan (RTTP).

There might be extraordinary events (like line blockages), which might require that any ongoing optimisation process is terminated immediately and a new optimisation cycle is started afterwards. This is illustrated with the flash symbol inside the dashed area in the SysML diagram.

The module of CDR is triggered cyclically in normal operating conditions. If infrastructure becomes unavailable or returns from unavailable to available, an event is sent from the

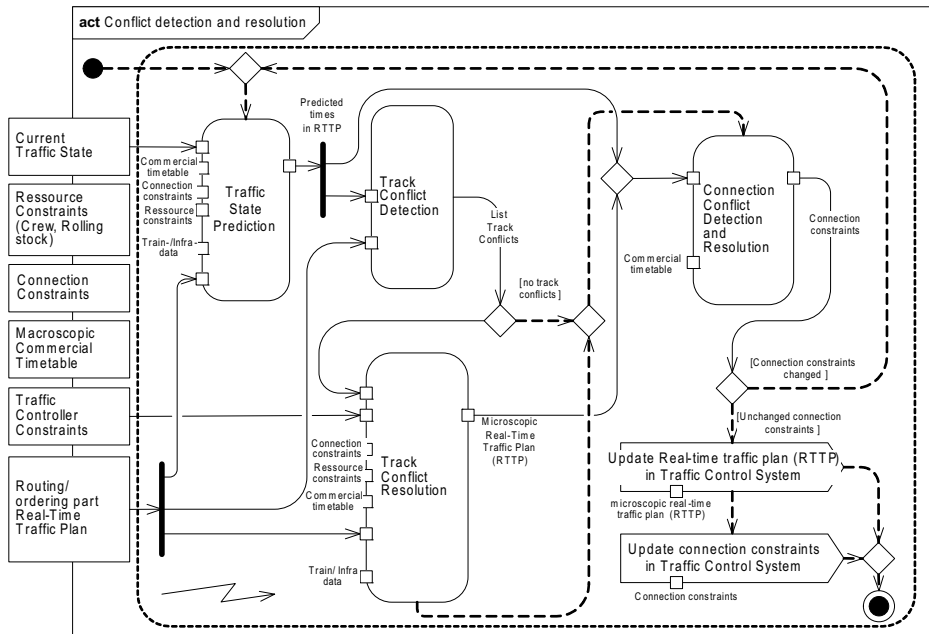


Figure 2: Conflict detection and resolution module as simplified SysML diagram.

Traffic Control System (TCS). In such a case, the routes of the trains which were originally planned over the element and those which are currently routed over diversionary paths must be checked and the routing part of RTTP be adapted accordingly. There might be trains for which no feasible routing can be found within the constraints of the commercial timetable/rolling stock/crew schedule. In such a case, the module of disruption management must be started which involves interaction between RU and IM.

The third sub-module is the Train Path Envelope Computation (TPEC) that aims at identifying the time allowances available in real operation that can be exploited by a train to adopt an energy-saving driving strategy without running late with respect to the timetable [Jae13]. This module is executed whenever the RTTP is updated (timing, routing or stopping part). A train path envelope must be computed for each moving train in the area. It should be noted, that the computation of train path envelopes does not require conflict resolution of any kind, i.e. it should run with any real-time traffic plan available in the PMM. The train path envelope is input to all computations related to train speed control.

A fourth sub-module is the Human-Machine Interface (HMI) which is focused on giving real-time information to the operators (dispatchers/traffic controllers) by a screen visualization of the current traffic state, e.g. through schematic infrastructure view, as well as past and the predicted traffic state, e.g. through the so-called train graph (time-distance diagram). Whatever visualization is used, it will be generated from the real-time traffic plan. Giving information continuously to the human operators is seen as one of the key success factors

for the project in order to guarantee acceptance of the tools by the operators and avoid the “turn it off” syndrome. The approach of involving humans in the process is called “control by awareness” [Gol13] as antonym to the commonly used concept of “control by exception”.

The HMI also allows a direct interaction between the operators and the RTTP, which is particularly useful in events where the operator might have more information from the field than the traffic management system. In such a case, operators can modify the RTTP which will then be implemented as such by the TCS. The differences to the last automatically computed RTTP are recorded as so-called operator constraints, which will be considered in the next automatic execution runs of the CDR sub-module as described above.

3 Train speed control

3.1 Functional description

In order to enable maximal throughput through bottlenecks, active control of train speed is necessary. Therefore, information from the perturbation management must be considered. In European railway networks, trains are predominantly controlled by human drivers. They can be technically supported in this task by so-called Driver Advisory Systems (DAS). There exist different options for distributing and sharing the intelligence between central units (CUs) and on-board units (OBU). The most reasonable architecture alternatives can be derived from the functional analysis of the speed control problem as given in Figure 3.

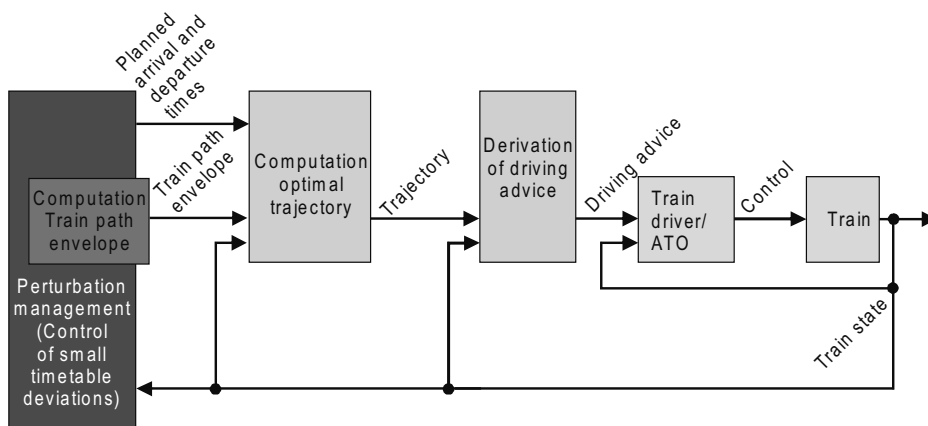


Figure 3: Nested structure of speed control loop.

Starting point for all computations is the train path envelope as provided by the perturbation management module. Within this envelope, a trajectory (speed over distance or time) must be computed, which is drivable (feasible) and fulfils a given objective function to the best possible extent, e.g. minimal energy consumption or number of required control actions.

Table 1: Comparison of the proposed architecture alternatives for Driver Advisory Systems (DAS).

Computation of trajectory	Computation of advice	Name architecture
Central unit	Central unit	DAS-C
Central unit	On-board unit	DAS-I
On-board unit	On-board unit	DAS-O

Driving advice or control commands for an Automatic Train Operation System (ATO) can then be derived from this trajectory. The execution of this advice or command determines speed and position of a train (its state). They can be measured by on-board or trackside sensors and fed back into each of the controllers previously described.

3.2 Distribution of intelligence and possible interface definitions

All controllers in the cascading control loop in Figure 3 can be realized either on-board (in the OBU) or off-board (in the CU). There exist therefore three basic architecture alternatives given in Table 1.

In the approach DAS-C (C = Central) all computations are done centrally. The driving advice (e.g. “Coasting” or “Drive at 120 km/h”) is transmitted from central to on-board unit every time a new control action is required. On-board, this advice must only be presented to the driver (visually or acoustically). The requirements on the on-board system are therefore quite simple, e.g. the cab-radio display could be used. Therefore this system has a high potential for interoperable application. However, the communication channel must be highly available, as no advice can be given without active connection between CU and OBU. Furthermore, train state information should be available in the CU with high accuracy. Both requirements are met e.g. on lines equipped with the European Train Control System (ETCS) level 2. One component of the system of fundamental importance is a highly available (and safe) communication channel between train and radio block centre which is among others used to transmit train position and speed several times per minute from train to RBC. This channel could also be used for transmitting driving advice in the other communication direction. An example for an existing system of this architecture is “Admirail”, which is installed and in full commercial operation since 2007 in the Lötschberg base tunnel in Switzerland [Mon09].

In the architecture called DAS-I (I = Intermediate) the optimal trajectory of the train within the envelope is computed centrally and transmitted to the OBU. Based on the trajectory and state information available on-onboard the advice is computed in the OBU. With such a system design, the communication channel is only needed when the trajectory changes, i.e. the requirements on availability of the communication channel are smaller, but the individual message size becomes bigger (trajectory compared to a single advice). If certain track and train data (track resistances, acceleration and braking behavior, running resistances of train)

are available both centrally and on-board in a consistent way, the communication message content can be reduced significantly, e.g. to the points where the driving regime changes. The OBU should react on deviations of real train behavior from the optimal trajectory, e.g. by displaying an advice different from the one foreseen in the optimal trajectory or by displaying the deviation from the trajectory to the driver. If large deviations are detected track-side in the CU, a new trajectory is computed and then sent to the OBU.

In the architecture DAS-O (O = On-board), both trajectory and driving advice are computed in the OBU. The train path envelope must be transmitted to from central to on-board unit. The OBU software must not only have access to current train data as suggested for DAS-I, but also have access to a complete set of valid track data including e.g. line speed, temporary speed restrictions, signal positions, track resistances. This can be provided either in an on-board track atlas or as part of the communication from CU to OBU. Further requirements for a system of such architecture are on-board sensors for position and speed, synchronized timing information in OBU and CU and available computation power in the OBU. These requirements are often fulfilled by existing DAS for energy-efficient driving as operational in several European railway undertakings, e.g. InLineFAS [Alb12] or CATO [Lag11]. These systems need to be extended with an interface for the train path envelope, while the algorithms might also need to be changed in order to guarantee that the trajectory and advice fulfill the constraints of the train path envelope.

It still needs to be discussed, in how far regulatory and commercial aspects of the relationship IM-RU need to be adapted if this kind of DAS is widely implemented. The reason therefore is that energy consumption of the trains will be significantly determined by the calculations of the IM, although in most European countries, energy cost has to be paid by the RU depending on actual energy consumption.

4 Demonstration and Validation approach

The proposed systems and algorithms will be tested in simulation scenarios for different locations throughout Europe:

- East Coast Main Line in the UK
- Iron Ore Line in Sweden
- A part of the Dutch network

Therefore the microscopic railway operation simulator HERMES shall be used (see Figure 4

HERMES was extended to import data on timetable, infrastructure and rolling stock given by the different infrastructure managers in different formats. They were transformed into the current version of the railML format ([rML13]), which is more and more used throughout Europe for railway specific data exchange between different software tools. The project partners of ON-TIME contributed to the improvement and extension of different aspects of the railML model, in particular a new approach for modeling the interlocking aspects has

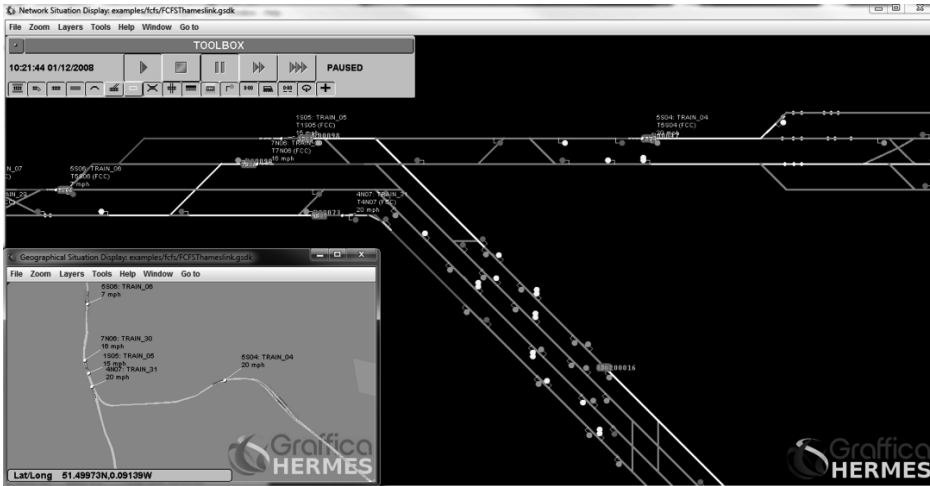


Figure 4: Screenshot of the microscopic train simulator HERMES for a part of the East Coast Mainline.

been developed together with the railML consortium and market leading manufacturers of signaling technology in Europe (Siemens, Thales, Alstom).

The simulator HERMES will be connected to industry products of the project partner Ansaldo STS and to the algorithms described in the previous sections of this paper using a service-oriented architecture developed in the project (See Figure 5). This will permit to show how algorithms perform in a closed control loop in practical settings. First simulation results are promising and show that current track conflict detection and resolution algorithms are able to deliver robust solutions of the real-time traffic plan in real time if applied in a rolling horizon optimization cycle [Qua13].

5 Conclusions

In the project ON-TIME an integrated approach to timetabling and real-time railway traffic management is being developed. The paper presented findings from the functional requirements definition phase which are now being implemented and tested in simulations.

The proposed approach will permit the railways to react on future developments in the field of decision support systems more quickly and by replacing algorithms independently from the underlying hardware and its long lifecycle.

The approaches developed in ON-TIME will be implemented in the next generation traffic management systems in Europe which will be called for tender in several of the countries involved in the project in the next few years. The project CAPACITY4RAIL partially funded by the European Commission will take up the results of ON-TIME and make further efforts

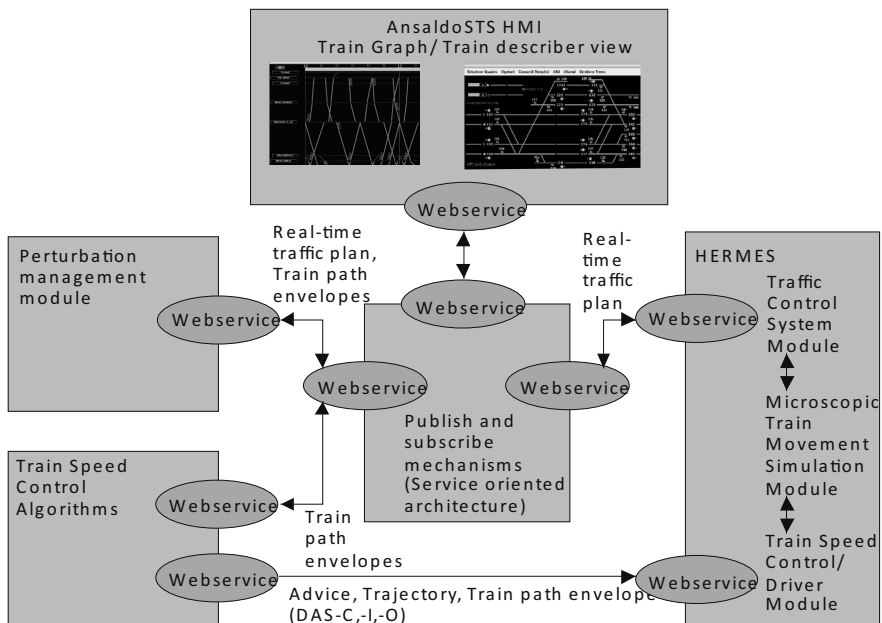


Figure 5: Service-oriented architecture developed in the project.

towards the automation of traffic management processes in a future European railway network.

Acknowledgements

The project ON-TIME (Optimal Networks for Train Integration Management across Europe) is co-funded by the European Commission within the Seventh Framework Programme (2007-2013), Grant agreement FP7-SCP01-GA-2011-285243.

References

- [Alb12] T. ALBRECHT, A. BINDER, and C. GASSEL: “Applications of real-time speed control in rail-bound public transport systems”. In: *IET Intelligent Transportation Systems* (2012), pages 305–314. DOI: 10.1049/iet-its.2011.0187.
- [Che10] L. CHEN, F. SCHMID, M. DASIGI, B. NING, C. ROBERTS, and T. TANG: “Real-time train rescheduling in junction areas”. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 224.6 (2010), pages 547–557.

- [Com11] E. COMMISSION: “White paper – roadmap to a single European transport area towards a competitive and resource efficient transport system”. In: *SEC*. Volume 359. 2011. URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52011DC0144:EN:NOT>.
- [Cor13] F. CORMAN and L. MENG: “A review of online dynamic models and algorithms for railway traffic control”. In: *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*. IEEE. Beijing, Aug. 30–Sept. 1, 2013, pages 128–133.
- [Dol14] T. DOLLEVOET, F. CORMAN, A. D’ARIANO, and D. HUISMAN: “An iterative optimization framework for delay management and train scheduling”. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 26.4 (2014), pages 490–515. URL: <http://repub.eur.nl/res/pub/32416/>.
- [Gol13] D. GOLIGHTLY, B. SANDBLAD, N. DADASHI, A. ANDERSSON, S. TSCHIRNER, and S. SHARPLES: “A sociotechnical comparison of automated train traffic control between GB and Sweden”. In: *Rail Human Factors: Supporting reliability, safety and cost reduction*. Edited by N. DADASHI, A. SCOTT, J. R. WILSON, and A. MILLS. CRC Press, 2013, page 367.
- [Gov13] R. M. GOVERDE, I. HANSEN, et al.: “Performance indicators for railway timetables”. In: *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*. IEEE. Beijing, Aug. 30–Sept. 1, 2013, pages 301–306.
- [Jae13] B. JAEKEL and T. ALBRECHT: “Interfacing Conflict Resolution and Driver Advisory Systems in Railway Operations”. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems 2013*. Edited by T. ALBRECHT, B. JAEKEL, and M. LEHNERT. Dresden: TUDpress, 2013, pages 333–343. ISBN: 978-3-944331-34-8.
- [Lag11] M. LAGOS: “CATO offers energy savings”. In: *Railway Gazette International (May 2011)*, pages 50–52.
- [Mon09] M. MONTIGEL: “Operations control system in the Lötschberg Base Tunnel”. In: *RTR - European Rail Technology Review* 2 (2009), pages 43–44.
- [ONT13] *ON-TIME Project Website*. 2013. URL: <http://www.ontime-project.eu/> (visited on 12/12/2013).
- [Pel13] P. PELLEGRINI, G. MARLIERE, and J. RODRIGUEZ: “A mixed-integer linear program for the real-time railway traffic management problem modeling track-circuits”. In: *IAROR, 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, RailCopenhagen 2013*. Copenhagen, May 13–15, 2013.
- [Qua13] E. QUAGLIETTA, F. CORMAN, and R. M. GOVERDE: “Impact of a stochastic and dynamic setting on the stability of railway dispatching solutions”. In: *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE. Oct. 6–9, 2013, pages 1035–1040.

- [rML13] *railML Website*. 2013. URL: www.railML.org (visited on 12/12/2013).
- [Rob13] C. ROBERTS and L. CHEN: “Optimal Networks for Train Integration Management across Europe”. In: *European Railway Review* 19.3 (2013), pages 48–52.

Corresponding author: Thomas Albrecht – Kontakt über: Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Telefon: +49 351 463-36784, E-Mail: vlp@tu-dresden.de

Mehrkriterielle Fahrplanbewertung und -optimierung unter Berücksichtigung der stochastischen Eigenschaften der Fahrgastwechselzeit

Anne Binder, Jürgen Krimmling, Thomas Albrecht
Technische Universität Dresden

Dieser Beitrag wurde veröffentlicht zur Konferenz 24. Verkehrswissenschaftliche Tage 2014, Dresden, 20.–21. März 2014.

1 Einleitung

Um einen optimalen Betrieb im Schienennahverkehr zu gewährleisten, sind innovative Verfahren sowohl in der Planung, als auch in der Betriebsablaufsteuerung erforderlich. Die Wechselwirkungen der unterschiedlichen Verfahren werden dabei von den zufälligen Störungen im Betriebsablauf beeinflusst. In diesem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, welcher die stochastischen Einflüsse des Fahrgastwechsels und den Einsatz von modernen Fahrzeitenregelungssystemen im Schienennah- und -regionalverkehr innerhalb der Bewertung und Optimierung von Fahrplänen berücksichtigt. Dadurch können Fahrpläne gefunden werden, welche mit größter Wahrscheinlichkeit die gewählten Gütekriterien minimieren. Der Ansatz wird anhand einer deutschen Regionalbahnlinie erstmalig untersucht und evaluiert.

2 Hierarchie von Planungs- und Betriebsebenen

Schienenpersonennah- und -regionalverkehr wird heute in Europa meist im festen Taktfahrplan betrieben. Zunächst wird in einer langfristigen übergeordneten Planung die Linien- und Taktplanung vorgenommen. Innerhalb einer zweiten Planungsebene, welche hier als Konfliktpunktplanung bezeichnet ist, wird ein konfliktfreier, realisierbarer Fahrplan erstellt, welcher die Ankunfts-, Abfahrt- und Durchfahrtszeiten an wichtigen Infrastrukturnetzpunkten festlegt. Anschließend werden die Fahr- und Haltezeiten an untergeordneten Haltestellen geplant. Dazu werden in der Praxis Fahr- und Haltezeiten im Sinne einer einheitlichen Taktlage für alle Betriebstage und -zeiten gleich geplant, obwohl insbesondere die Haltezeiten starken tageszeit- und wochentagsabhängigen Schwankungen unterliegen. Im letzten Schritt

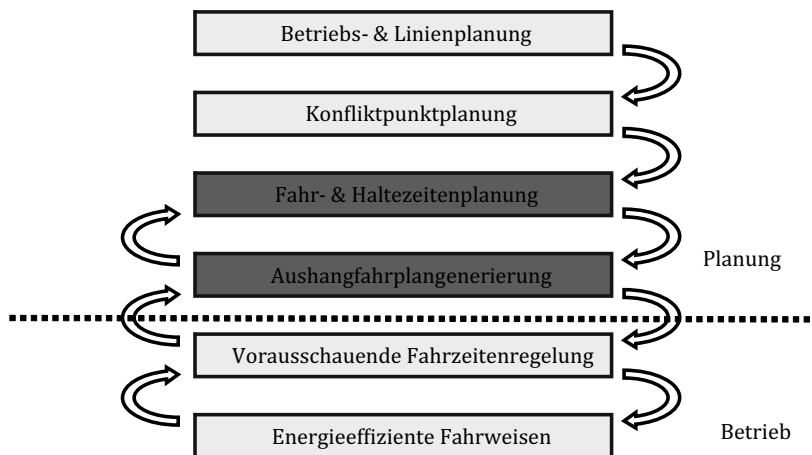


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Betriebs- und Planungsebenen im fahrplangebundenem Schienenverkehr.

des Planungsprozesses wird – zumeist durch Abrunden auf ganze Minuten – der publizierte Aushangfahrplan generiert. Dieser Fahrplan bildet die Grundlage des Betriebes und ist eine wichtige Eingangsgröße für die Echtzeit-Regelung des Fahrbetriebes. Der Fahrplan bildet somit die Rahmenbedingungen für den Verkehrsbetrieb und hat demzufolge großen Einfluss auf die Möglichkeiten einer vorausschauenden Fahrzeitenregelung und der energieeffizienten Fahrweise, wie in Abbildung 1 dargestellt. Zusätzlich werden wichtige Qualitätskenngrößen des Bahnbetriebes wie z. B. Energieverbrauch, Fahrplanabweichungen entlang einer Fahrt sowie Pünktlichkeit an Messpunkten unmittelbar durch den Fahrplan und im Speziellen durch den Schritt der Aushangfahrplangenerierung beeinflusst, obwohl dieser in der Literatur kaum Beachtung findet [Gov13].

3 Bewertung von Fahrplänen

3.1 Einfluss der Stochastik der Fahrgastwechselzeiten

Innerhalb des Betriebes von Nahverkehrsunternehmen stellt die Haltezeit eine erhebliche Einflussgröße auf den Betrieb dar. Dabei wirken als Eingangsgrößen die geplanten Ankunfts- und Abfahrtszeiten. Dieser wird neben anderen größeren Störfaktoren im Nahverkehr insbesondere durch die Stochastik der Haltezeiten beeinflusst. Die Streuungen der Haltezeiten, gekennzeichnet durch potentiell kurze Haltezeiten (minimale Haltezeit T_{\min} von z. B. 20 Sekunden), aber auch durch mögliche lange Haltezeiten führen zu Abweichungen vom geplanten Betriebsablauf. Durch vorausschauende Fahrweisen und Fahrerassistenzsysteme, werden diese möglichst minimiert und deren Einflüsse auf gewählte Gütekriterien, wie z. B. Fahrplanabweichung, gering gehalten. Dennoch führen diese stochastischen Einflüsse ebenso zu

Tabelle 1: Quantifizierung der Pünktlichkeit innerhalb unterschiedlicher Schienenverkehrsnetze (Quellen: <http://www.bahn.de>; <http://www.ns.nl>; <http://www.nahverkehrhamburg.de>).

	Pünktlichkeitsfenster	Prozentsatz pünktlicher Züge
DB Regio	5 Minuten	95,6 % (Mai 2013)
NS [Nederlandse Spoorwegen]	5 Minuten	94,9 % (2011)
	3 Minuten	90,1 % (2011)
Hamburger Hochbahn	3 Minuten	98,0 % (2011)

streuenden Qualitätskriterien. Beispielsweise stellt bei der Quantifizierung der Pünktlichkeit die Messung des Prozentsatzes der Fahrten, welche innerhalb eines tolerierten Pünktlichkeitsfensters liegen, eine entscheidende Qualitätskenngröße dar. Tabelle 1 zeigt veröffentlichte Daten der unternehmensspezifischen Pünktlichkeitsquantile, welche die Wahrscheinlichkeiten einer pünktlichen Ankunft bzw. Abfahrt an den Messpunkten darstellen. Demnach sind beispielsweise im Mai 2013 95,6 % aller Züge der DB Regio innerhalb der 5min-Pünktlichkeit verkehrt.

3.2 Ansatz zur Optimierung des Planungsprozesses

Auf den unterschiedlichen Planungsebenen wird aktuell der dargestellte Einfluss sowohl der Stochastik der Haltezeiten als auch der vorausschauenden Fahrzeitenregelung nicht berücksichtigt. Auf Grundlage der minimalen Fahrzeiten, Haltezeitenschätzung und der Festlegung der Fahrzeitreserve wird der Fahrplan generiert. Im Betrieb werden dann Pünktlichkeitskenngrößen (an wichtigen Halten), Energieverbrauchswerte und Fahrplanabweichungen an Unterwegshalten zur Bewertung der Qualität eines Fahrplans ermittelt (Abbildung 2 oben).

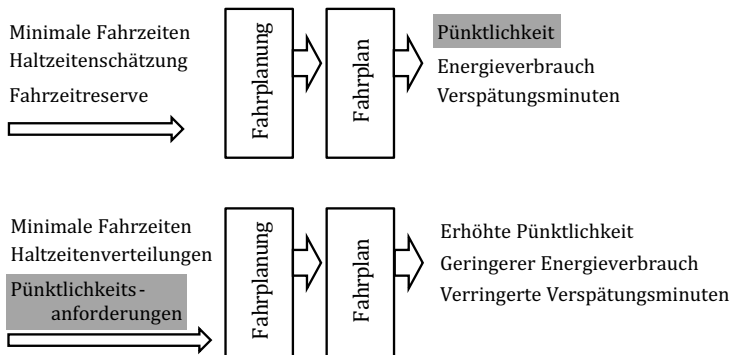


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Fahrplanungsansätze (oben: klassische Fahrplanung; unten: innovativer Fahrplanungsansatz).

Im hier vorgestellten innovativen Ansatz werden Pünktlichkeitsanforderungen bereits bei der Fahrplanerstellung definiert, d.h. welcher Pünktlichkeitswert soll unter Berücksichtigung der Stochastik der Haltezeiten erreicht werden. Die definierten Anforderungen, die

minimalen Fahrzeiten und die erwarteten Haltezeitenverteilungen werden hier bereits in der Fahrplanerstellung berücksichtigt. Beide Ansätze sind in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

3.3 Qualitätsparameter

Sowohl die Güte der Fahrzeitenregelung im Betrieb aber auch der Fahrpläne kann anhand unterschiedlicher Güteparameter gemessen werden [Alb05]. Die generierten Fahrpläne werden anhand unterschiedlicher Gütekriterien Q_q , $q \in \{1, 2, 3\}$, bewertet. Innerhalb des hier vorgestellten Ansatzes werden drei Kriterien gewählt, welche die unterschiedlichen Interessen der Beteiligten widerspiegeln:

- Q_1 : Energieverbrauch
- Q_2 : Fahrgastrelevante Verspätung an untergeordneten Haltestellen
- Q_3 : Pünktlichkeit an definierten wichtigen Haltestellen

All diese Kriterien sind durch die Dauer der Fahrgastwechselzeiten, die Wahl der Fahrzeiten und den nicht linearen Bedingungen, welche durch den Fahrplan gegeben sind, beeinflusst. Sie können folglich nicht nominell berechnet werden, sondern es können für die Ankunfts- und Abfahrtszustände nur Erwartungswerte der Gütekriterien berechnet werden. Dabei muss jeweils die Abfahrtsbedingung (Abfahrt frühestens zur geplanten Abfahrtszeit) gewährleistet werden, was zu möglichem Warten nach Beendigung des Fahrgastwechsellvorgangs führen kann.

Der Gesamtenergieverbrauch wird von einer Vielzahl unterschiedlicher fester Faktoren, wie Rollmaterial und Infrastruktur, beeinflusst. Zusätzlich beeinflusst die Höhe der Fahrzeitreserve auf jedem Abschnitt den Energieverbrauch $E_i(t_i)$. Der Energieverbrauch für jeden Abschnitt i bei unterschiedlichen Fahrweisen und Fahrzeitreserven kann durch die bekannten Theorie der energieoptimalen Zugsteuerung ermittelt werden [Alb05]. Der Erwartungswert des Energieverbrauches hängt von der Verteilungsfunktion der Haltezeiten $f(t)$ ab.

Verspätungen an wichtigen Infrastrukturpunkten und Haltestellen können nicht immer komplett ausgeschlossen werden. Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit und die Höhe des Erwartungswertes einer Zielverspätung ein wichtiges Kriterium für den Betreiber, um mögliche Konflikte abschätzen zu können.

Obwohl die untergeordneten Haltestellen als weniger wichtig für die Betriebsstabilität erachtet werden, sind aus der Sichtweise des Fahrgastes auftretende Fahrplanabweichungen dennoch relevant. Deshalb ist die Höhe der positiven Fahrplanabweichungen an den untergeordneten Haltestellen das dritte zu berücksichtigende Qualitätskriterium.

3.4 Ermittlung der Gütekriterien

Das vorhandene Verfahren der Fahrzeitenregelung aus [Bin12] wird um die der Stochastik der Fahrgastwechselzeiten erweitert, welche aus historischen Realisierungsdaten gewonnen werden kann. Dabei führen zufällige Haltezeiten zu zufälligen Verspätungen oder Fahrzeitenverkürzungen, welche durch die Erwartungswertermittlung quantifiziert werden können.

Diese stochastische, dynamische Fahrzeitenregelung wird genutzt, um unterschiedliche Fahrpläne anhand ausgewählter Kriterien zu bewerten. Neben erwarteten Verspätungen an wichtigen und untergeordneten Haltepunkten ist der Erwartungswert des Energieverbrauchs für zufällige Betriebssituationen ein Gütekriterium in der mehrkriteriellen Optimierung innerhalb des Planungsprozesses. Bei diesem Ansatz wird auf eine differenzierte, rekursive Ermittlung der Qualitätskriterien der Ankunfts- und Abfahrtszustände; Q^{An} und Q^{Ab} zurückgegriffen.

Die Erwartungswertbildung berücksichtigt die Übergangswahrscheinlichkeiten der Haltezeiten $f(t)$ an untergeordneten Haltestellen. Auf deren Grundlage werden alle Gütekriterien determiniert:

- Rekursive Berechnung der Gütekriterien für Zustände der Abfahrtssebene Q^{Ab} :

$$Q_{q,i}^{\text{Ab}}(t) = Q_{q,i}^{\text{Ab}}(t_{\text{plan}}) \text{ für } t < t_{\text{plan}}$$

$$Q_{1,i}^{\text{Ab}}(t) = E_i(t_i) + Q_{1,i+1}^{\text{An}}(t = t + t_i) \text{ für } t \geq t_{\text{plan}}$$

$$Q_{2,i}^{\text{Ab}}(t) = Q_{2,i+1}^{\text{An}}(t = t + t_i) \text{ für } t \geq t_{\text{plan}}$$

$$Q_{3,i}^{\text{Ab}}(t) = Q_{3,i+1}^{\text{An}}(t = t + t_i) \text{ für } t \geq t_{\text{plan}}$$

- Rekursive Berechnung der Gütekriterien für Zustände der Abfahrtssebene Q^{An} :

$$Q_{1,i}^{\text{An}}(t) = \int_{T_{\text{min}}}^{T_{\text{max}}} f(\tau) Q_{1,i}^{\text{Ab}}(t + \tau) d\tau$$

$$Q_{2,i}^{\text{An}}(t) = \max(0, t - t_{\text{plan}}) + \int_{T_{\text{min}}}^{T_{\text{max}}} f(\tau) Q_{2,i}^{\text{Ab}}(t + \tau) d\tau$$

$$Q_{3,i}^{\text{An}}(t) = \int_{T_{\text{min}}}^{T_{\text{max}}} f(\tau) Q_{3,i}^{\text{Ab}}(t + \tau) d\tau$$

- Berechnung der Gütekriterien unter Nutzung folgender Ankunftsdefinitionen an der Zielstation I :

$$Q_{1,I}^{\text{An}}(t) := 0$$

$$Q_{2,I}^{\text{An}}(t) := 0$$

$$Q_{3,I}^{\text{An}}(t) := \max(0, t - t_{\text{plan}})$$

In [Bin13] werden die Fahrzeitenregelung und die Ermittlung der Gütekriterien ausführlich beschrieben.

Ergebnis dieser Fahrzeitenoptimierung sind dabei Erwartungswerte der Gütekriterien, für die erste betrachtete Station $Q_{q,1}^{\text{Ab}}$, welche den zu Grunde liegenden Fahrplan berücksichtigen und die Werte der Gütekriterien signifikant beeinflussen. Daher repräsentieren diese Erwartungswerte der Gütekriterien an den wichtigen Halten eine Qualität/Güte des Fahrplanes zwischen zwei wichtigen Haltestellen, 1 und I . Unterschiedliche Fahrpläne führen folglich zu unterschiedlichen Erwartungswerten und unter allen möglichen Fahrplänen existiert ein optimaler Fahrplan bzgl. der gewählten Qualitätskriterien und der gewählten Lösungsmethode.

4 Fahrplanoptimierung

In diesem Beitrag wird weiterhin vorgestellt, wie sich unterschiedliche Wertigkeiten und Wichtungen der Kriterien innerhalb des Fahrplanungsprozesses auf die erwarteten Betriebsabläufe in der Realität auswirken. Zusätzlich soll dargelegt werden, wie unterschiedliche Eingangsdaten das Ergebnis der Fahrplanoptimierung beeinflussen. Dabei werden zwei Ansätze der mehrkriteriellen Fahrplanoptimierung untersucht und jeweils zwei Arten der möglichen Datengrundlage differenziert (haltestellenfeine Verteilungsfunktionen; allgemeine Gesamtmodellierung der Verteilungsfunktionen an ungeordneten Haltestellen).

4.1 Lexikographische Ordnung der Gütekriterien

Bei der Priorisierung einzelner Gütekriterien wird der Fahrplan ausgewählt, welcher zu dem Minimum von nur einem der gewählten Kriterien führt. Dies verdeutlicht die Komplexität des Planungsprozesses, welcher auf die unterschiedlichen Interessengruppen Rücksicht nehmen muss, da andernfalls die erreichten Ergebnisse die anderen Interessengruppen benachteiligen würden. Jedoch zeigt die Auswahl eines Fahrplanes nach lexikographischer Ordnung die Möglichkeiten und Anwendbarkeit des vorgestellten Algorithmus und soll daher ebenso zunächst in der Fallstudie untersucht werden.

4.2 Mehrkriterielle Optimierung von Fahrplänen

Die Rückgabewerte des Verfahrens der Verteilung der Fahrzeitreserve sind die Erwartungswerte für die gewählten Kriterien für alle möglichen Ankunfts- und Abfahrtszustände für den restlichen Fahrverlauf bis zur folgenden Zielstation. Folglich, geben die Erwartungswerte bei der Abfahrt an der ersten Station $Q_{q,1}^{Ab}$, eine Auskunft über die Güte des Fahrplans bis zur nächsten Zielstation, da die Fahrplankenngößen die Erwartungswerte signifikant beeinflussen. Um den optimalen Fahrplan φ^* aus einer Menge von Fahrplänen φ_k zu ermitteln, müssen diese Werte analysiert werden. Innerhalb dieser ersten Untersuchung wurden alle möglichen Kombinationen von Ankunfts- und Abfahrtszeiten an den untergeordneten Haltestellen ermittelt und bewertet. Die Werte werden innerhalb eines weiteren mehrkriteriellen Optimierungsansatzes genutzt, um den optimalen Fahrplan auszuwählen. Auch dieser Ansatz erfordert die Definition der Wichtungsfaktoren der unterschiedlichen Bewertungskriterien. Auf dieser zweiten Optimierungsebene kommt die Kompromissmethode als mehrkriterielles Optimierungsverfahren zum Einsatz und die Auswahl des optimalen Fahrplanes erfolgt unter Minimierung des Abstandes zum Idealpunkt:

$$\varphi^* := \min_{\varphi_k} \sqrt{\sum_q v_q (Q_{q,1}^{Ab}(\varphi_k) - \min_{\varphi_k} Q_{q,1}^{Ab}(\varphi_k))^2}$$

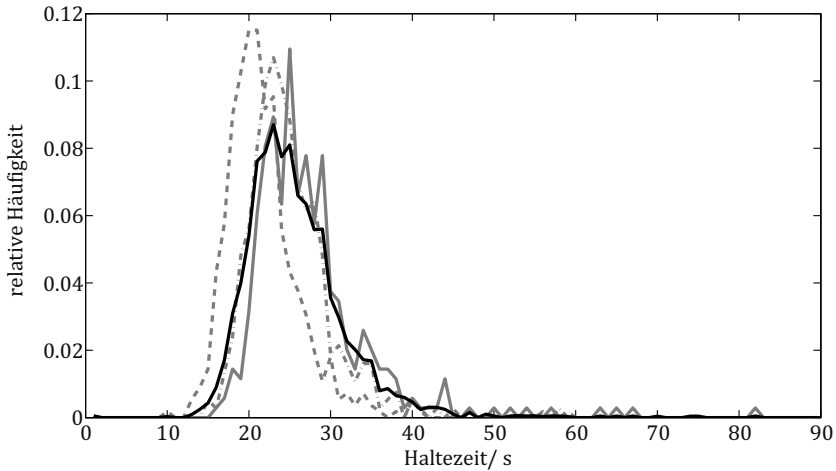


Abbildung 3: Gegenüberstellung der Haltezeitenverteilung von stationsfeiner Filterung (grau für drei unterschiedliche Haltestellen) und globaler Haltezeitenverteilung (schwarz).

5 Fallstudie

5.1 Datengrundlage

Die Erprobung des Verfahrens erfolgte anhand einer deutschen Regionalbahnlinie. Für diese wurden die Energieverbräuche bei verschiedenen Fahrzeiten für alle Streckenabschnitte unter Nutzung einer Simulation ermittelt, welchen ebenso für die Berechnung der energieeffizienten Fahrweise innerhalb eines Fahrerassistenzsystems zum Einsatz kommt [Alb12]. Die Verteilung der Haltezeiten wurden aus der Analyse historischer Daten eines Fahrgastzählsystems gewonnen. Dabei wurden über einen Zeitraum von drei Monaten haltestellenfein die Ankunfts- und Abfahrtszeiten protokolliert. Unter geeigneter Filterung der Datengrundlage entstehen somit Verteilungsfunktionen der Haltezeit für alle untergeordneten Haltestellen, die anhand der Ein- und Aussteigerzahlen plausibilisiert werden konnten. Um den Nutzen der haltestellenfeinen Filterung zu analysieren und den Ansatz auch für den Einsatz bei unsicherer Datengrundlage zu ermöglichen, wurden zusätzlich Berechnungen unter Nutzung einer globalen Verteilungsfunktion durchgeführt, welche sich aus den Haltezeiten an allen untergeordneten Haltestellen zusammensetzt. Abbildung 3 zeigt den Unterschied zwischen möglichen Verteilungsfunktionen, die bei stationsfeinen Filterung ermittelt werden (grau, beispielhaft für die Stationen LWEG, LGAL und LNHM) und einer Verteilungsfunktion, welche alle untergeordneten Haltestellen zusammenfasst (schwarz, LWEG - LFE).

5.2 Durchführung

Für die unterschiedlichen Verteilungsfunktionen wurde die Bewertung der möglichen Fahrpläne unter Nutzung der stochastischen, dynamischen Fahrzeitenregelung durchgeführt. Die

Erwartungswerte der Gütekriterien zeigen dabei, dass sie von der Wahl der genutzten Verteilungsfunktionen abhängig ist.

Die gesamte Verteilungsfunktion ist durch eine größere Streuung gekennzeichnet, was sich auf die Erwartungswerte der Gütekriterien auswirkt.

Für verschiedene Kombinationen von Gütekriterien und Wichtungsfaktoren ergeben sich jeweils unterschiedliche optimale Abfahrts- und Ankunftszeiten in dem mehrkriteriellen Optimierungsansatz nach der Kompromissmethode.

5.3 Ergebnisse

Tabelle 2 zeigt die Erwartungswerte der Fahrpläne, welche unter Nutzung der unterschiedlichen Optimierungsansätze ermittelt wurden.

Tabelle 2: Ergebnisse der lexikographischen und mehrkriteriellen Fahrplanoptimierung

Lösungs- ansatz	FPid	Separate Verteilungen			FPid	Globale Verteilung		
		$Q_{1,1}^{Ab}$ / kWh	$Q_{2,1}^{Ab}$ / s	$Q_{3,1}^{Ab}$ / s		$Q_{1,1}^{Ab}$ / kWh	$Q_{2,1}^{Ab}$ / s	$Q_{3,1}^{Ab}$ / s
min $Q_{1,1}^{Ab}$	1	94,57	38,13	104,8	1	94,75	38,2	103,0
min $Q_{2,1}^{Ab}$	2	97,86	0,08	46,63	2	98,22	0,13	46,4
min $Q_{3,1}^{Ab}$	3	110,05	878,58	0,00	3	110,05	891,7	0,00
[1 1 1]	4	98,24	0,41	0,90	4	98,5	0,57	0,17
[1 10 1]	5	98,25	1,04	0,05	4	98,5	0,57	0,17
[10 1 1]	4	98,24	0,41	0,90	5	98,4	0,31	1,08

Es wird zunächst deutlich, dass die Anwendung der lexikographischen Ordnung der Gütekriterien bei der unterschiedlichen Priorisierungen der Kriterien zu den identischen, optimalen Fahrplänen führt. Dies ist unabhängig von der Wahl der separaten oder der globalen Verteilungen der Haltezeiten.

Beim Vergleich der Erwartungswerte hingegen zeigen sich die Auswirkungen der Schätzung der Haltezeiten als globale Verteilungsfunktion. Die Erwartungswerte der Energieverbräuche für haltestellenfeine Verteilungsfunktionen liegen dabei unter denen der global geschätzten Haltezeitenverteilung. Dies liegt insbesondere an der höheren Streuung der angewandten Verteilung.

Bei der mehrkriteriellen Optimierung der Fahrpläne wird deutlich, dass es auf Grund unterschiedlicher Wichtungen zu unterschiedlichen, optimalen Fahrplänen kommen kann. Tabelle 2 zeigt ebenso die optimalen Fahrpläne bei unterschiedlichen Wichtungen der Kriterien. Dabei bedeutet eine [1 1 1] in der Spalte Lösungsansatz eine Wichtung der Kriterien innerhalb der Fahrplanoptimierung mit $v_1 = 1$, $v_2 = 1$ bzw. $v_3 = 1$.

Es wird deutlich, dass in Abhängigkeit der Wichtung, aber unabhängig von der Lösungsmethode zwei Fahrpläne als optimal ausgewählt werden (FPid 4 und FPid 5). Jedoch ist die Sensibilität der optimalen Lösungen gegenüber der Wichtung der Kriterien unterschiedlich. Bei einer gleichmäßigen Wichtung wird jeweils der Fahrplan mit der FPid 4 als optimal gewählt. Eine höhere Wichtung der akkumulierten Verspätung an untergeordneten Haltestellen

[1 10 1] führt bei der Anwendung der separaten Verteilung zum optimalen Fahrplan mit der FPid 5 bei der Anwendung der globalen Verteilung hingegen zum Fahrplan mit der FPid 4. Die Unterschiede der Erwartungswerte der Gütekriterien sind nur marginal.

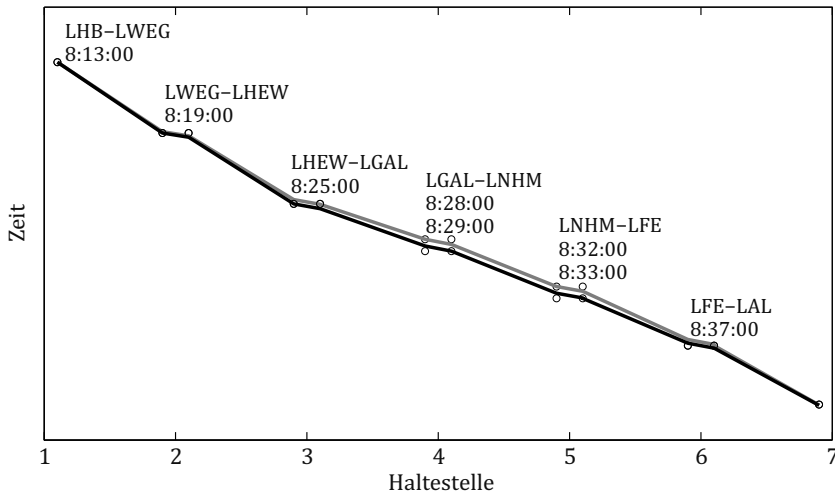


Abbildung 4: Darstellung der optimalen schematischen Zeit-Weg-Linien unter Anwendung des 50%-Haltezeitenquantils bzgl. unterschiedlicher Fahrpläne (FahrplanID 4 – grau, FahrplanID 5 – schwarz).

Vergleicht man die zwei in der mehrkriteriellen Optimierung gefundenen Lösungen, wird deutlich, welche Auswirkungen eine globale oder haltestellenfeine Verteilungsfunktion haben.

Die Anwendung einer Verteilungsfunktion mit einer hohen Streuung führt dabei zu einer vorrangigen Auswahl eines Fahrplanes, welche die zur Verfügung stehende Fahrzeitsreserve vorrangig am Ende des betrachteten Abschnittes plant. Die Abfahrtszeiten an den ersten Haltestellen sind demzufolge so geplant, dass möglichst viel Fahrzeitsreserve auf den letzten Teilabschnitten vor der wichtigen Haltestelle zur Verfügung steht. Dies liegt daran, dass die hohe Streuung der Verteilungsfunktionen an den untergeordneten Haltestellen zu einer hohen Unsicherheit und Wahrscheinlichkeiten für Verspätungen auf Grund eines langen Fahrgastwechsels führt. Somit wird die Reserve benötigt, um mögliche positive Fahrplanabweichungen vor der wichtigen Haltestelle abzubauen.

Die Nutzung einer haltestellenfeinen Verteilungsfunktion hingegen führt bei gleichmäßiger Wichtung zu einem anderen optimalen Fahrplan, welcher mehr Betriebsreserve auf den ersten drei Abschnitten verteilt. Dies liegt daran, dass die genutzten Verteilungsfunktionen geringere Unsicherheiten bei der Schätzung der Haltezeit charakterisieren und somit ein geringeres Risiko für eine Verspätung an der Zielhaltestelle berücksichtigt werden muss.

6 Fazit

Die dargelegte Fallstudie zeigt die Anwendbarkeit des Ansatzes anhand einer deutschen Regionalbahnlinie. Dies verdeutlicht, dass innerhalb des Fahrplanungsprozesses sowohl unterschiedliche Gütekriterien als auch die Stochastik des Fahrgastwechsels berücksichtigt werden können.

Literaturverzeichnis

- [Alb05] T. ALBRECHT: „Energy-efficient train control in suburban railways: experiences gained from onboard tests of a driver assistance system“. In: *1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, RailDelft2005*. 8.–10. Juni 2005.
- [Alb12] T. ALBRECHT und M. PATHE: „Pilotierung eines Assistenzsystems zur kraftstoffsparenden Fahrweise im SPNV“. In: *EI - Eisenbahningenieur* 63.9 (Sep. 2012), Seiten 66–70.
- [Bin12] A. BINDER und T. ALBRECHT: „Energieoptimale Echtzeit-Fahrzeitenregelung bei schienengebundenen Nahverkehrssystemen“. In: *23. VWT - Verkehrswissenschaftliche Tage*. Dresden, 29.–30. März 2012.
- [Bin13] A. BINDER und T. ALBRECHT: „Timetable Evaluation and Optimization under Consideration of the Stochastic Influence of the Dwell Times“. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems 2013*. Herausgegeben von T. ALBRECHT, B. JAEKEL und M. LEHNERT. Dresden: TUDpress, 2013, Seiten 471–481. ISBN: 978-3-944331-34-8.
- [Goo01] C. J. GOODMAN und S. MURATA: „Metro traffic regulation from the passenger perspective. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F“. In: *Journal of Rail and Rapid Transit* 215 (2001), Seiten 137–147. DOI: 10.1243/0954409011531468.
- [Gov13] R. M. GOVERDE und I. A. HANSEN: „Performance indicators for railway timetables“. In: *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT) 2013*. Beijing, 30. Aug.–1. Sep. 2013, Seiten 301–306. DOI: 10.1109/ICIRT.2013.6696312.
- [How94] P. G. HOWLETT, I. P. MILROY und P. J. PUDNEY: „Energy-Efficient Train Control“. In: *Control Engineering Practice* 2.2 (1994), Seiten 193–200.

Korrespondierender Autor: Anne Binder, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Telefon: +49 351 463-36764, E-Mail: anne.binder@tu-dresden.de

Verfahren und Architekturen zur Integration von Verkehrsmanagement- und Assistenzsystemen bei Eisenbahnen

Birgit Jaekel, Thomas Albrecht

Technische Universität Dresden

Dieser Beitrag wurde veröffentlicht zur Konferenz 24. Verkehrswissenschaftliche Tage 2014, Dresden, 20.–21. März 2014.

1 Einleitung

Im europäischen Eisenbahnnetz wird für die nächsten Jahre eine weiter wachsende Verkehrsnachfrage erwartet, die u. a. durch häufigere Zugfahrten gedeckt werden muss. Die negativen Wirkungen bestehender Kapazitätsengpässe auf die Qualität im Gesamtnetz werden dadurch zunehmen, darüber hinaus werden neue Kapazitätsengpässe entstehen. Zur Bewältigung dieser Anforderungen werden im EU-Forschungsprojekt ON-TIME („Optimal Networks for Train Integration Management in Europe“) innovative Ansätze im Verkehrsmanagement entwickelt. Das Konsortium besteht aus den national agierenden Eisenbahninfrastrukturmanagern Deutschlands (DB Netz), Großbritanniens (Network Rail), Schwedens (Trafikverket), Frankreichs (SNCF/ RFF), Italiens (RFI) und 14 international ausgerichteten Partnern aus Industrie und Forschung.

Ziel des Projekts ist die Entwicklung und Erprobung eines modularen Systemdesigns für das Eisenbahnverkehrsmanagement. Wichtigster Teil für die langfristige Wirkung des Projekts sind Vorschläge für standardisierte Schnittstellen zwischen einzelnen Modulen. So wird es möglich, Hardware- und Softwarekomponenten der Leittechnik langfristig zu nutzen, die Intelligenz der Verfahren zur Betriebssteuerung jedoch in kurzen Intervallen zu verbessern. Eine der wesentlichen, zu untersuchenden Schnittstellen ist die zwischen Entscheidungen der streckenseitigen Disposition und der Fahrweise der Züge. In der streckenseitigen Disposition werden – durch automatische Systeme oder durch den Disponenten – Fahrwege der Züge und deren Reihenfolge auf bestimmten Infrastrukturelementen festgelegt. Dies wird im sogenannten mikroskopischen Echtzeitfahrplan (englisch: Real-Time Traffic Plan – RTTP) hinterlegt, welcher u. a. für jeden einzelnen Gleisbelegungsabschnitt die Reihenfolge der darauf verkehrenden Zugfahrten beschreibt. Diese Vorgabe der Disposition soll nun durch optimale Fahrweisen umgesetzt werden, d. h. möglichst unter Vermeidung von Rothalten sowie

unter Anwendung energiesparender Fahrweisen. Hierzu sind als Hilfsmittel für die Triebfahrzeugführer Fahrerassistenzsysteme (FAS) am Markt verfügbar, allerdings müssen diese Informationen über die aktuellen Dispositionsentscheidungen berücksichtigen, um die Aufgabenstellung zu erfüllen. Als Schnittstelle wird ein Netz aus sogenannten Zuglaufkorridoren, der sogenannte Train Path Envelope (TPE) definiert.

In [Lid13a] wurde erstmals ein Verfahren zur optimalen Ermittlung solcher Korridore vorgestellt. Der vorliegende Beitrag erläutert eine Erweiterung des Verfahrens, mit dem dieses auch für betriebliche Situationen an der Kapazitätsgrenze mit akzeptablen Rechenzeiten angewandt werden kann.

Abschnitt 2 erläutert die Grundprinzipien des Verfahrens, seine Anwendung auf der Eisenbahnlinie in Schweden wird in Abschnitt 3 dargelegt. Abschnitt 4 stellt die Umsetzung und Demonstration des Konzepts dar, die Zusammenfassung erfolgt in Abschnitt 5.

2 Ermittlung Zuglaufkorridore

Um bestehende Konfliktlösungssysteme mit Fahrerassistenzsystemen zu verbinden, wurde ein Interface entwickelt, das es erlaubt, die Lösung des Konfliktlösungssystems so zu verarbeiten, dass die Ausgabe Zielpunkte der mit dem Fahrerassistenzsystem zu optimierenden Fahrten enthält. Dabei sollen Zuglaufkorridore so konstruiert werden, dass konfliktfreies, energiesparendes Fahren ermöglicht wird.

2.1 Eingangsgröße mikroskopischer Echtzeitfahrplan

Als Eingabe dient hierbei der sogenannte mikroskopische Echtzeitfahrplan, der für den gewählten Netzausschnitt die vollständigen Informationen über die geplanten Zugfolgen, Zugläufe sowie Art und Ort von Halten mit ihren Ankunfts- und Abfahrzeiten enthält. Da Konfliktlösungssysteme oft mit vereinfachten Zuglaufmodellen arbeiten, werden die von ihnen ermittelten Fahrzeiten nicht übernommen.

Der Echtzeitfahrplan spiegelt einen Ausschnitt des Systems wider. Dabei werden für alle Züge $\theta_i \in \Theta$ und alle Abschnitte $s_j \in S$ Tupel $t_{ij} = (t_{\text{res}}, t_{\text{occ}}, t_{\text{rel}})$ der Reservierungs- und Belegungszeiten gegeben. Weiterhin gibt es für jeden Zug eine Menge von Abschnitten $S_{H,i}$ an denen ein Halt geplant ist. Daher werden für alle Züge $\theta_i \in \Theta$ und alle Abschnitte $s_j \in S_{H,i}$ Tupel $h_{ij} = (x, t_{\text{arr}}, t_{\text{dep}})$ sowie eine Abbildung der Tupel auf Fahrplanelemente gegeben und so eine Zuordnung der Halte zu geplanten kommerziellen Halten ermöglicht.

Die Fahrt eines Zuges $\theta_i \in \Theta$ über einen Abschnitt $s_j \in S$ bildet ein Ereignis $e_{ij} \in E$. Das heisst jeder Zug kann jeden Abschnitt höchstens ein Mal befahren. Der RTTP enthält zwei Sichten auf die Abfolge von Ereignissen: Während die Zugsicht für jeden Zug θ_i eine geordnete Folge $\pi_{\theta_i} : S \mapsto N$ von zu durchfahrenden Abschnitten bietet, zeigt die Infrastruktursicht eine geordnete Folge $\pi_{s_j} : \Theta \mapsto N$ von Zügen, die einen Abschnitt s_j nutzen.

Zur weiteren Betrachtung werden Relationen direkter Nachfolger definiert:

$$R_{\theta,i} = \left\{ (e_{ij}, e_{ik}) \in E^2 \mid \pi_{\theta_i}(s_k) = \pi_{\theta_i}(s_j) + 1 \right\},$$

$$R_{s,j} = \left\{ (e_{ij}, e_{lj}) \in E^2 \mid \pi_{s_j}(\theta_l) = \pi_{s_j}(\theta_i) + 1 \right\}.$$

Damit enthält R^{-1} Tupel, bestehend aus einem Ereignis, sowie dessen Vorgänger.

2.2 Konzept des Zuglaufkorridors

Für jeden Zug wird ein Zuglaufkorridor ermittelt. Für die betrachteten Abschnitte enthält dieser reservierte Fahrzeitintervalle und zulässige Geschwindigkeiten. Fahrzeitintervalle sind überschneidungsfrei und entlang eines Zuglaufes so angeordnet, dass unter Einbeziehung der Geschwindigkeiten wenigstens ein fahrbarer Pfad enthalten ist.

Ein Pfad gelte als fahrbar, wenn die enthaltene Folge von Weg-Zeit-Geschwindigkeitspunkten theoretisch eingehalten werden kann. Der Nachweis erfolgt mittels mikroskopischer Simulation. Fahrbarkeit bezieht sich in dieser Definition also nicht auf die Fahrbarkeit im Sinne von physikalischer Umsetzbarkeit auf der Strecke zum Zeitpunkt der Durchführung oder der Durchführbarkeit durch den Triebwagenführer.

2.3 Constraint-Programmierung zum Ermitteln von Train Path Envelopes

Um einen konfliktfreien TPE zu erzeugen, der innerhalb der Randbedingungen energiesparendes Fahren ermöglicht, wird, angelehnt an [Lid13a; Lid13b], eine Constraint-Programmierung vorgenommen. Dabei wird jeder Zugfahrt auf einem Abschnitt ein Ereignis zugewiesen. Die Abfolge der Ereignisse ergibt sich aus dem RTTP. Des Weiteren gelten Randbedingungen für Ankunfts- und Durchfahrzeiten, Fahrzeiten und Zugfolgezeiten. Eine ausführlichere Beschreibung der Modellierung findet sich in [Jae13].

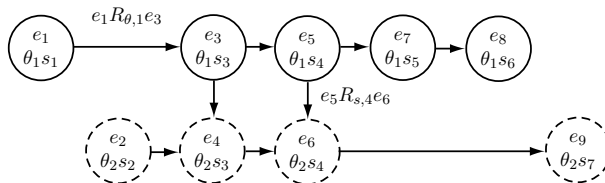


Abbildung 1: Ereignisgraph zweier kreuzender Züge.

Für jedes Ereignis e_{ij} werden optimale Zeiten und Geschwindigkeiten gesucht:

optimale Zeiten nach Ereignis e_{ij} : $t_{ij}^{\min*} < t_{ij}^{\max*}$,

optimale Geschwindigkeit nach Ereignis e_{ij} : v_{ij}^* .

2.4 Vorverarbeitung

Kritische Punkte

Zur Verringerung der Ereignisanzahl wird ein vorbereitender Vereinfachungsschritt vorgenommen. Dazu werden ausgehend von der RTTP-Zugsicht für jeden Zug diejenigen Positionen ermittelt, an denen sich Zugfolgen, gegeben in der RTTP-Infrastruktursicht, ändern. Ereignisse mit den dazugehörigen Variablen und Randbedingungen werden nun für alle Abschnitte zwischen je zwei benachbarten dieser Punkte definiert.

Es wird also nur noch auf der Untermenge $U_{\text{krit}} \subseteq E$

$$U_{\text{krit}} = \bigcup_{\theta, i \in \Theta} U_{\theta, i}$$

der relevanten Ereignisse

$$U_{\theta, i} = \left\{ e_{ij} \in E \mid \exists (e_{ij}, e_{ik}) \in R_{\theta, i} : R_{s, j}(e_{ij}) \neq R_{s, k}(e_{ij}) \vee R_{s, j}^{-1}(e_{ij}) \neq R_{s, k}^{-1}(e_{ij}) \right\}$$

operiert.

Mit dieser Ereignismenge können Überhol- und Kreuzungsvorgänge modelliert werden. Um auch flüssige Folgefahrten zu erreichen, werden diese in einem späteren Verarbeitungsschritt getrennt betrachtet.

Dazu wird die Menge

$$U_{\text{Folge}} = \left\{ e_{ij} \in E \mid \exists (e_{ij}, e_{kj}) \in R_{s, j} : R_{\theta, i}(e_{ij}) = R_{\theta, k}(e_{ij}) \vee \exists (e_{lj}, e_{ij}) \in R_{s, j} : R_{\theta, l}(e_{ij}) = R_{\theta, i}(e_{ij}) \right\},$$

also die Streckenabschnitte mit einander folgenden Zügen betrachtet.

Fahrzeiten

Mittels mikroskopischer Simulation wurden minimale Fahrzeiten unter Beachtung der jeweiligen Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie maximale Fahrzeiten im Hinblick auf die geringste durch das FAS empfehlbare Geschwindigkeit ermittelt. Für die Optimierung mit stetigen Variablen werden die für bestimmte Kombinationen von Start- und Endgeschwindigkeit berechneten Fahrzeiten mittels bikubischen Splines interpoliert.

Energieverbräuche

Zur Optimierung des Energieverbrauchs der im TPE zusammengefassten Fahrten wurden zunächst Energieverbräuche energieoptimierter Fahrten auf den Einzelabschnitten betrachtet. Dabei wurde, wie in Abbildung 3 gezeigt, deutlich, dass ein starker, nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Differenz aus Start- und Endgeschwindigkeit und dem minimierten Energieverbrauch besteht. Ein Zusammenhang von Fahrzeit und Energieverbrauch

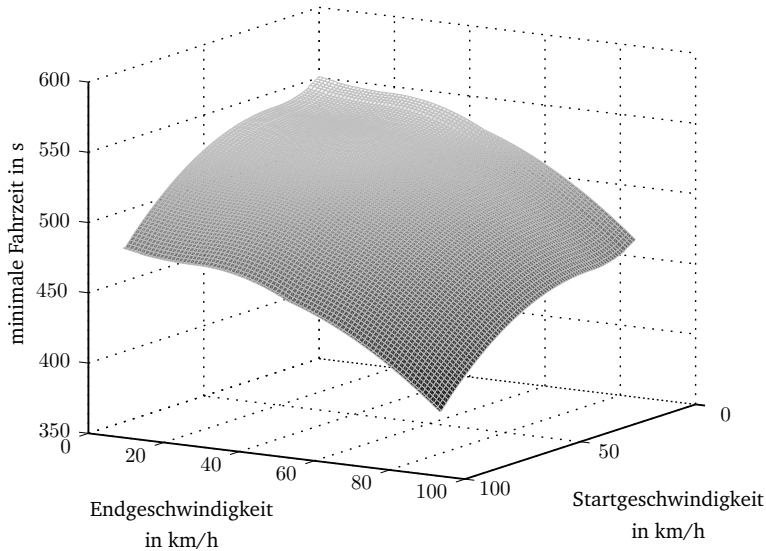


Abbildung 2: Minimale Fahrzeit in Abhängigkeit von Start- und Endgeschwindigkeit.

lässt sich jedoch nicht darstellen, so dass auf eine fahrzeitabhängige Modellierung des Energieverbrauchs zunächst verzichtet wird.

Für jeden Abschnitt kann der Energieverbrauch in Abhängigkeit der Startgeschwindigkeit v_s , der Endgeschwindigkeit v_e und gegebenen Geradenparametern m_{ij} und n_{ij} mit $E_{ij} = m_{ij}(v_e - v_s) + n_{ij}$ angenähert werden.

2.5 Umsetzung

Die Berechnung des Zuglaufkorridors erfolgt in drei Schritten. Im ersten Schritt wird für alle Züge ein fahrbarer Pfad ermittelt.

Für nacheinander fahrende Züge muss bei festen Signalblöcken

$$\forall i, j, k, l \text{ mit } (i, j) \in R_{s,k} \cap R_{s,l}, (l, k) \in R_{\theta,i} \cap R_{\theta,j} : t_{il}^{\max} \leq t_{jk}^{\min} + \text{Puffer}$$

gelten. Daher wurde gegenüber der in [Lid13a] dargestellten Umsetzung ein Zwischenschritt eingefügt, der das Einhalten dieser Randbedingung sicherstellen soll.

Sind danach für alle Züge fahrbare Pfade berechnet worden, werden darauf aufbauend Zeitfenster zugewiesen und so der eigentliche Zuglaufkorridor konstruiert.

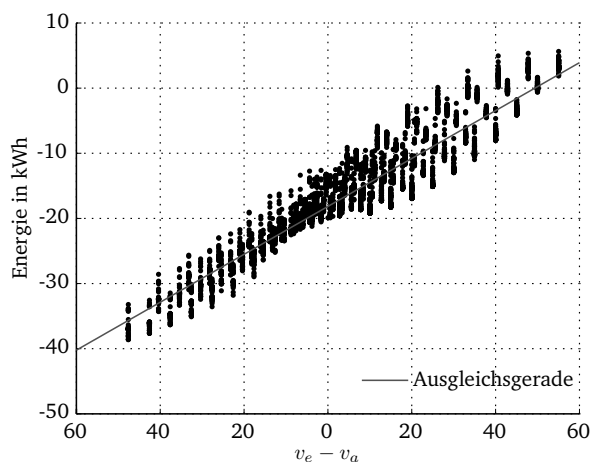


Abbildung 3: FAS-minimierter Energieverbrauch der Zugfahrt auf einem Abschnitt in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsdifferenz.

Fahrbare Pfade

Die Berechnung fahrbarer Pfade erfolgt mittels Constraint-Programmierung. Das Einhalten von Mindestzugfolgezeiten als lineare Randbedingung sorgt für Überschneidungsfreiheit, während die minimalen und maximalen Fahrzeiten auf den einzelnen Abschnitten als nicht-lineare Randbedingungen einfließen.

Es erfolgt eine Minimierung des angenäherten Energieverbrauchs unter Einbeziehung eines Strafwertes für Geschwindigkeiten, die unterhalb der für ein Fahrerassistenzsystem empfehlbaren Geschwindigkeit v_{DAS} liegen.

$$\min(E) = \min \left(\sum_{e_{ij} \in E} \left[m_{ij}(v_e - v_s) + n_{ij} + \omega \max(v_{\text{DAS}} - v_{e_{ij}}, 0) \right] \right).$$

Folgefahrten

In einem zweiten Schritt werden Fahrzeiten für Folgefahrten ermittelt, die der obigen Randbedingung genügen. Dabei werden zunächst nur die Punkte der Folgefahrten sowie deren Nachbarschaft im Hinblick auf Fahrbarkeit betrachtet und die fahrbare Lösung mit der geringsten Abweichung von der ursprünglichen gesucht.

Sei also $N(e_{ij}) = \{e_{ik} \in U_{\text{krit}} \mid (e_{ij}, e_{ik}) \in R_{\theta,i} \vee (e_{ik}, e_{ij}) \in R_{\theta,i}\}$ die Menge der dem Ereignis e_{ij} folgenden oder vorausgehenden Ereignisse (Nachbarereignisse) eines Zuges. Die Nachbarschaft einer Ereignismenge U sei $N(U) = \bigcup_{e_{ij} \in U} N(e_{ij})$.

Im p -ten Iterationsschritt wird auf der Menge U_{Folge}^p operiert. Es seien

$$\begin{aligned} U_{\text{Folge}}^0 &= U_{\text{Folge}} \\ U_{\text{Folge}}^{p+1} &= U_{\text{Folge}}^p \cup N(U_{\text{Folge}}^p). \end{aligned}$$

Ist es dabei nicht möglich die Fahrzeiten der Randpunkte $N(U_{\text{Folge}}^{p-1})$ zu belassen, so muss die Optimierung erneut unter Hinzunahme der Nachbarpunkte der geänderten Randpunkte durchgeführt werden. Für fahrbare RTTP-Varianten wird so nach n Schritten eine Lösung gefunden.

Fahrbare Korridore

Im dritten Schritt wird den betrachteten Zügen eine Sequenz von Durchfahrzeitintervallen zugewiesen. Um sicherzustellen, dass diese Zuglaufkorridore tatsächlich fahrbar sind, werden die Randbedingungen für Durchfahrzeiten in diesem Schritt so gesetzt, dass die Lösung des ersten Schrittes in den so entstehenden Intervallen enthalten ist.

$$t_{ij}^{\min*} < t_{ij}^* < t_{ij}^{\max*}$$

Die Optimierung erfolgt in diesem Schritt für alle Ereignisse $U_{\text{krit}} \cup U_{\text{Folge}}^{n+1}$. Um den Spielraum einer anschließenden Fahrspieloptimierung offen zu halten, sollen den einzelnen Zügen möglichst große Zeitfenster zugewiesen werden, ohne unnötig große Unterschiede in der Länge der Durchfahrzeitintervalle zu erzeugen. Dazu wird die Zielfunktion

$$- \sum_{e_{ij} \in E} \sqrt{t_{ij}^{\max} - t_{ij}^{\min}}$$

minimiert.

3 Fallstudie

Grundlage des gewählten Szenarios bildet die Eisenerzstrecke Narvik-Luleå die vorrangig von Güterzügen befahren wird. Sechs Züge, die über einen Zeitraum von etwa 100 Minuten verkehren und einander kreuzen, aber auch Streckenabschnitte einander folgend befahren, wurden ausgewählt. Drei davon sind in Abbildung 4 dargestellt.

Sichtbar ist die Kreuzung des roten und grünen Zuges etwa bei Kilometer 28 sowie deren gegenläufiges Fahren und das richtungsgleiche Fahren von Zügen bei Kilometer 52. Die schwarzen Rechtecke repräsentieren die ermittelten Zeitintervalle $[t_{ij}^{\min*}, t_{ij}^{\max*}]$, die für die Überfahrt der jeweiligen Position vorgesehen sind. Wie zu erwarten, nutzt der Algorithmus zulässige Fahrzeiten so aus, dass nur noch der vorgegebene Puffer zwischen den Durchfahrzeitintervallen zweier aufeinanderfolgender Züge als nicht zugewiesene Zeit verbleibt. Die berechneten Blockzeiten sind mit Hilfe von Rechtecken dargestellt. Damit wird deren

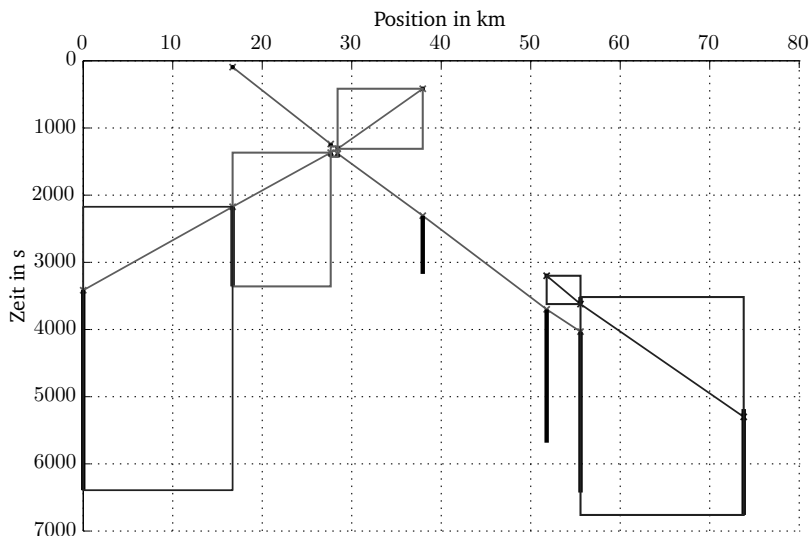


Abbildung 4: Grafischer Fahrplan von Kreuzung und Folgefahrt jeweils zweier Züge.

Überschneidungsfreiheit und so die prinzipielle Eignung des Verfahrens zur Ermittlung von Zuglaufkorridoren deutlich.

Die Umsetzung des Prototypen erfolgte mittels C#, wobei für alle Optimierungen auf MATLAB-Funktionen zurückgegriffen wurde. Der ausführende Rechner verfügt über eine Taktfrequenz von 3.1 GHz und vier GB RAM.

Das Szenario umfasst in den ersten zwei Schritten 442 Variablen und damit auch 442 nichtlineare Randbedingungen, sowie etwa 300 lineare Randbedingungen. Durch das Zusammenfassen der Abschnitte konnte die Anzahl der Variablen und Randbedingungen nahezu halbiert werden. Die Rechenzeit wurde dadurch etwa gezehntelt und beträgt für diese Fallstudie etwa 10 Sekunden. Den rechenzeitintensivsten Teil stellt nunmehr die Optimierung der Folgefahrten dar. Hierfür müssen in dieser Fallstudie 100 Variablen veranschlagt werden.

Es bleibt zu prüfen, ob hier auf nichtlineare Randbedingungen verzichtet werden sollte oder durch das Einbeziehen des Zugabstandes weitere Vereinfachungen und wesentliche Rechenzeiteinsparungen ermöglicht werden.

Der dritte Schritt benötigt zur optimalen Lösung weniger als eine Sekunde, da er ohne nichtlineare Randbedingungen auskommt. Die Fahrbarkeit der Korridore wird hier bereits durch das Setzen der Grenzen des Suchraumes sichergestellt wird.

4 Umsetzung des Konzepts

Die Ermittlung der Zuglaufkorridore ist wesentlicher Bestandteil der in ON-TIME entwickelten Architektur für ein Echtzeitverkehrsmanagement, wie sie in einem Ausschnitt in 6

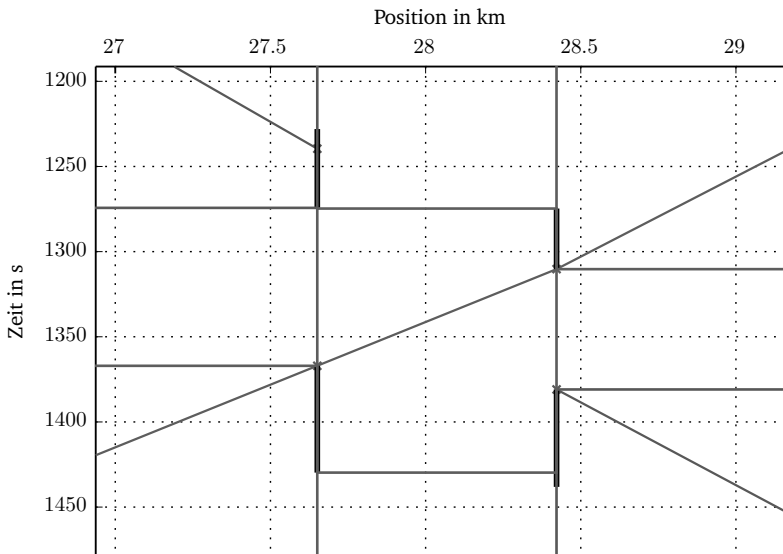


Abbildung 5: Ausschnitt aus Abbildung 4; berechnete Blockzeiten und Durchfahrzeitintervalle an der Kreuzungsstelle.

dargestellt ist. Aus den durch die Module Verkehrszustandserfassung und -prognose bereitgestellten Informationen ermittelt die Konflikterkennung und -lösung die optimalen Fahrwege und Reihenfolge der Züge auf den kritischen Fahrwegelementen, den mikroskopischen Echtzeitfahrplan. Aus diesem werden für alle Züge Zuglaufkorridore (in der Netzsicht) ermittelt. Diese werden pro Zug für weitere Berechnungen in eine Zugsicht aufbereitet, d. h. in Zeitfenster an bestimmten Positionen entlang der Zugfahrt. Innerhalb dieser Zeitfenster wird die optimale Trajektorie des Zuges (Geschwindigkeit entlang des Fahrwegs) ermittelt, aus der eine Fahrempfehlung für den Fahrzeugführer oder eine Einrichtung zur automatischen Zugsteuerung (ATO) generiert werden kann.

Die Verfahrensschritte der Trajektorienermittlung sowie der Ableitung der Fahrempfehlung können dabei sowohl zentral als auch dezentral (an Bord des Zuges) ausgeführt werden [Alb13]. Aus Steuerungssicht lassen sich die größten Vorteile generieren, wenn Abweichungen von der Trajektorie bzw. der gegebenen Fahrempfehlung möglichst zügig erkannt und darauf reagiert werden kann, bevor der Zug den gegebenen Zeitkorridor verlässt. Daher ist es empfehlenswert die Trajektorie auf dem Fahrzeug zu ermitteln oder zumindest dorthin zu übertragen.

Für die Implementierung wird das Konzept der Service-orientierten Architektur genutzt. Alle Module können Informationen bereitstellen (Publisher) oder abonnieren (Subscriber), der Datenaustausch erfolgt über Webservices. Für die quasi-statischen Daten zur Beschrei-

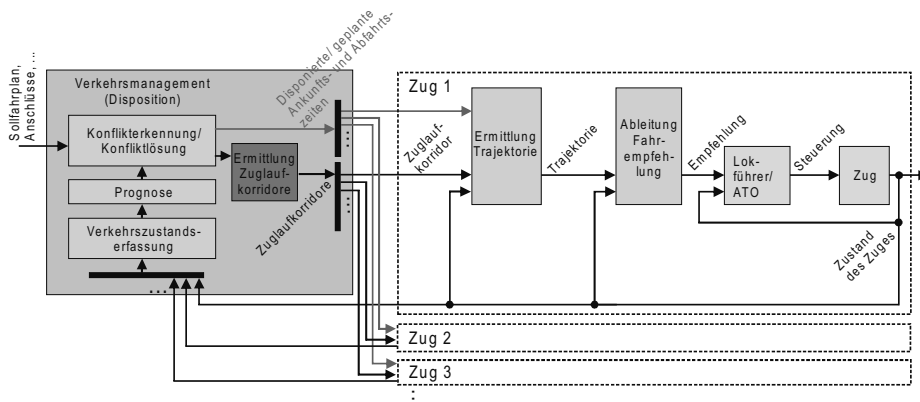


Abbildung 6: Einordnung der Zuglaufkorridorermittlung in die Gesamtarchitektur.

bung der Infrastruktur wird das Format railML in Version 2.2 genutzt. Hierzu wurde ein Erweiterungsvorschlag für die Beschreibung der Leit- und Sicherungstechnik implementiert.

Das Gesamtkonzept soll in Kopplung mit einer Betriebssimulation sowie dem Originalbedienplatz einer Betriebszentrale des Herstellers Ansaldo STS demonstriert werden. Dabei sollen Teile verschiedener hochbelasteter europäischer Beispielstrecken untersucht werden. Diese umfassen die East Coast Mainline in Großbritannien, die Eisenerzlinie in Nordschweden, Tilburg-Eindhoven-Den Bosch sowie Bologna Centrale.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass der mikroskopische Echtzeitfahrplan als Grundlage für den Betrieb von Fahrerassistenzsystemen zur Verminderung betrieblicher Störungen geeignet ist. Er kann mit dem vorgestellten Verfahren in Zuglaufkorridore, die sich aufgrund ihrer Genauigkeit und ihres Umfangs zur Übermittlung an Fahrerassistenzsysteme eignen, umgewandelt werden.

Eine weitere Erhöhung der Rechengeschwindigkeit bei der Optimierung ist geplant, so dass ein echtzeitfähiger Einsatz auch für umfassendere Beispiele möglich wird. Des Weiteren soll die Modellierung auf von im Echtzeitfahrplan geplanten betrieblichen sowie nicht-betrieblichen Halte erweitert werden.

Nach Abschluss dieser Erweiterung erfolgt das Einbinden in die Gesamtarchitektur. Damit wird es möglich, Konfliktlösungs- und Fahrerassistenzsysteme zu verbinden und so Vorteile beider zu nutzen.

Das ON-TIME Projekt läuft noch bis Ende 2014. Auf der Projektwebseite [ONT13] sind neben der Darstellung der Berechnung der Zuglaufkorridore, Projektberichte zur Gesamtarchitektur und deren Einzelkomponenten frei zugänglich.

Danksagung

Das Projekt ON-TIME wird durch die Europäische Union im Rahmen des 7. Forschungsrahmenprogramms gefördert (Projektnummer FP7-SC01-GA-2011-285243).

Literaturverzeichnis

- [Alb13] T. ALBRECHT: „Projekt ON-TIME: Ansätze für ein modularisiertes Verkehrsmanagement bei Eisenbahnen“. In: *EIK - Eisenbahningeurkalender 2014* (2013), Seiten 279–288.
- [Jae13] B. JAEKEL und T. ALBRECHT: „Interfacing Conflict Resolution and Driver Advisory Systems in Railway Operations“. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems 2013*. Herausgegeben von T. ALBRECHT, B. JAEKEL und M. LEHNERT. Dresden: TUDpress, 2013, Seiten 333–343. ISBN: 978-3-944331-34-8.
- [Lid13a] T. LIDÉN: „Optimal adjustment of scheduling times in railway real time traffic planning“. In: *Collection of abstracts of the 6th Nordic Optimization Symposium*. Göteborg, 24.–26. Okt. 2013. URL: <http://www.soaf.se/images/collection-of-abstracts-with-index.pdf>.
- [Lid13b] T. LIDÉN: „Optimal Adjustment of Scheduling Times in Real Time Traffic Planning“. ON-TIME Project paper. 2013.
- [ONT13] *ON-TIME Project Website*. 2013. URL: <http://www.ontime-project.eu/> (besucht am 01.03.2013).

Korrespondierender Autor: Birgit Jaekel, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Telefon: +49 351 463-36786, E-Mail: birgit.jaekel@tu-dresden.de

Operational Railway Management as Part of an Integrated Railway Management Process

Birgit Jaekel, Thomas Albrecht

Technische Universität Dresden

The paper was published at: EURO-ZEL 2014, Zilina, 3.–4. Juni 2014.

Abstract

With the increasing demand for freight and passenger transport towards 2050 which the EEA (European Environment Agency) and the Swiss institute *prograns* stated the railway freight transport demand will increase by 100 percent. To meet these requirements an efficient use of the existing railway infrastructure is needed as a massive construction of railway lines is in most cases not desired or not affordable. The European Union project ON-TIME aims on increasing the railway capacity by the use of optimisation modules during the whole railway management process. The paper describes this process with focus on the operational management and the need to interface between modules running in the infrastructure manager's operational centre, like conflict solving in dispatching and the modules situated at the railway undertaking's side, like driver advisory systems (DAS) with their functional and technical requirements and the design possibilities for realisation given by those. Therefore communication systems as well as modelling aspects like the amount of distribution of the intelligence are discussed. An outlook on the simulation of the management process in the ON-TIME project is given.

1 Introduction

During the next years towards 2050 an increasing traffic volume with an overall increase of 50 % and a doubling of the transport performance in Europe has been prognosed by a study of the Swiss institute *prograns* (see [Ick07]) which was commissioned by the Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). This increase will particularly meet international and transnational traffic (regarding Germany, towards an amount of 1/5 of freight traffic) while a rising traffic demand in inner country transport area is expected only for eastern European countries. Additionally, a shift in the modal split towards freight transport on the rail is needed, because otherwise the road network will not be able to manage the transport demand. As a massive construction of railway lines is not desired in most cases

the existing infrastructure has to be used efficiently in order to gain capacity and therefore to meet this growing traffic demand.

The FP7 EU project “Optimal Networks for Train Integration Management across Europe” (ON-TIME, see [ONT13]) aims on increasing the capacity by a reduction of delays and improved traffic fluidity. Therefore existing solutions to this challenge made by railways, scientists or undertakings are analysed concerning common operating principles. Combined with an understanding of the needs of the railway undertakings of different European countries, e.g. Germany, Italy, France, England and Sweden a framework to integrate state-of-the-art solutions in traffic planning, management and train control is developed. Standardised interfaces shall thereby ensure the usability of the framework to a wide range of railway undertakings. Additionally, the improvements made in capacity and delay will be shown using different scenarios of national and international rail traffic in a simulation environment.

In the following sections an overview of the railway management process is given and the interfaces between its elements are defined. Technical and functional design possibilities for interfacing between modules running in the infrastructure manager’s operational centre and the modules situated at the railway undertaking’s side.

2 Railway Management Process

Although each railway undertaking has its own conventions in the planning and management process the main parts are common. Figure 1 shows the timetabling process as a process concerning transport demand and path requests and allocation by railway undertakings (RU) and infrastructure managers (IM), respectively. The resulting timetable is called a macroscopic commercial timetable and input of the real-time management processes.

Real-time perturbation management (RTPM) is the process of handling minor incidents and deviations from the timetable. Actions like bending trains and changing train sequences which lie in the responsibility of the IM are carried out, and can be widely automated.

In disruption management also decisions which lay in the RU’s responsibility, like skipping a commercial stop, breaking a connection or changing the route in a way that makes a planned stop impossible are made. Major incidents forcing those decisions like vehicle or infrastructural failures with a following adaptation of the commercial timetable require a close communication between RU’s and IM. The disruption management process will be therefore not automated, but supported by systems generating and evaluating possible solutions, which are presented to the concerned staff. Output of RTPM and disruption management is the microscopic RTTP.

Real-time perturbation management and disruption management are the main parts of the dispatching process, completed by the train speed control of driver advisory systems. The driver advisory system enables the train driver to move the train in a way that reduces stops in front of red signals and therefore to reduce energy consumption and increase the capacity at a time. In addition to the perturbation management it can be used to drive without affecting other trains using the same infrastructure more than necessary.

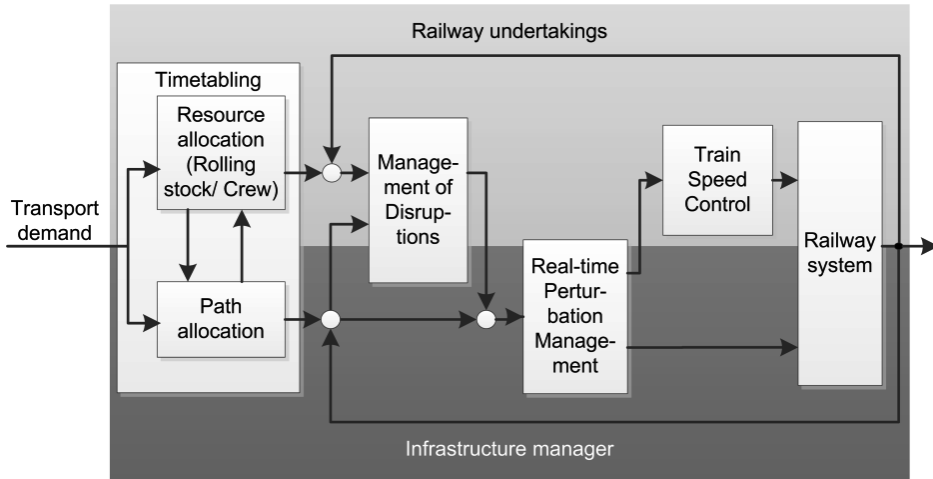


Figure 1: Control circuit of railway planning and traffic management; note the responsibilities of dark gray: infrastructure managers and light gray: railway undertakings.

3 Interface Architecture Principles

The application framework (see [NTT13]) built in the ON-TIME project is a modular and distributed middleware for the event-based communication purposes. The distribution of the systems leads to a higher fault-tolerance but causes an overhead especially regarding consistency management of stored data, like the microscopic real-time-traffic plan. This plan is updated frequently when changes in conflict solution are needed. Therefore it has to be ensured that all modules working on it use the same version. Beside this, distribution has a main advantage because all partners in railway planning and management process are able to operate their systems on their own hardware in their controlled environment having their hands on data as well as on algorithms.

Standardised interfaces were defined with whose data concerning timetable, real-time traffic plan and DAS related data can be exchanged. To reach further extensibility XML will be used as the message language for the functional communication load. RailML will function as data format for timetabling, infrastructure, rolling stock and interlocking, as well.

3.1 Technical Interfaces

For the communication of the different modules (see Figure 2) a middleware using Service Oriented Architecture (SOA) has been built. The service is event-based, with use of a document-based database management system (DBMS). This enables the middleware to handle messages with flexible structure and by use of replication to many physical database containers high availability is reached. One major disadvantage of this principle is that write-consistency cannot be ensured, because read-write actions are done asynchronously on the distributed database.

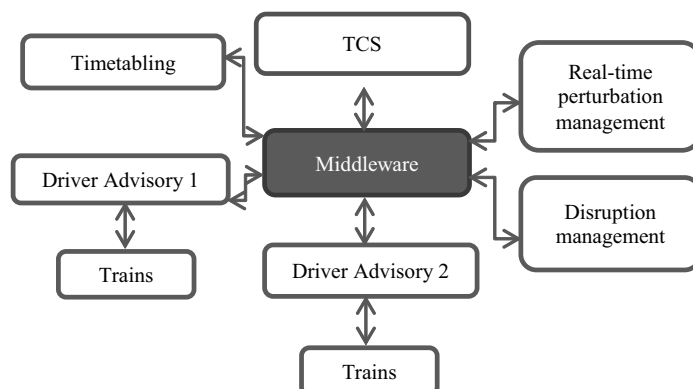


Figure 2: Distribution of modules.

The chosen implementation of the middleware uses a Representational State Transfer (REST) style. It provides the possibility to the modules to subscribe to an event type (e.g. timetable changed) or to do single GET or POST requests to gain information (e.g. for receiving the timetable) or to send a message to the server (e.g. for updating the timetable), respectively.

The middleware ensures that event messages published are delivered to all its subscribers, which are managed in a separate database.

All the communication is done via HTTP protocol and therefore platform independent, simply by use of a URI and could be done in a browser.

An exceptional position has the interface to the driver advisory system and to the train driver afterwards. The first needs a separate conversion, while the latter part might not be done via middleware but using DAS specific communication modes. Also its functional distribution might differ and will be considered in section 3.2.

3.2 Functional Interfaces

Dispatching – Driver Assistance: Train Path Envelope

The interface between conflict solution and DAS is designed to enable drivers to follow the plan built by the conflict solution. Therefore this plan or its derivatives has to be presented to the train driver. Conflict solution outputs train sequences for each track section, while DAS work on sequences of (s, v, t) -target points or time intervals.

As the driver is only concerned with the movement of its own train, the interface will generate a train path envelope (TPE). This contains as a train view the so called train corridor for each train. The train corridor consists of velocities, time intervals and position references for each track detection section, which are generated using a constraint model (described in [Jae13]). Train corridors will be sent to the driver advisory central where the speed optimisation is performed.

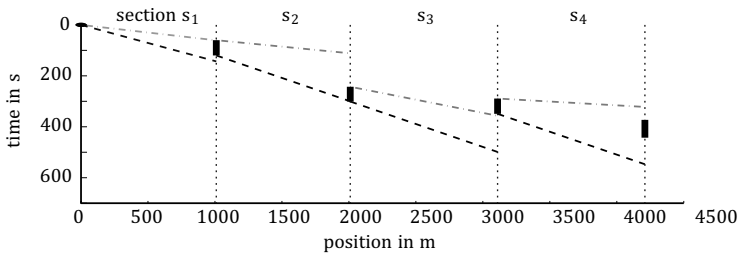


Figure 3: Non drivable envelope; boxes: envelope time windows, dashed: slowest path without stop on each section, dash-dotted: fastest path on each section.

To ensure that the driver advisory system is enabled to do its optimisation the drivability of the corridor has to be guaranteed. This means that the solution space given by the corridor has to contain a valid solution to the DAS optimisation.

Therefore the theoretical ability to move inside the corridor concerning a microscopic simulation has to be given.

The possibility for a train to reach certain driving times mainly depends on the given times, the velocity restrictions given by the track, the train physics, which are supposed as static and the velocity which may be given for start and destination of the run. Therefore the TPE-computation works on solution spaces concerning velocities and running times as well, despite of regarding only running times. In the latter case a situation like shown in Figure 3 can occur, where in section s_3 the planned running time cannot be reached, because the train is forced to leave section s_2 with a too low speed.

Within the module it is aspired to construct corridors in a way that keeps the train sequences and allows for energy optimal driving. Therefore the energy consumption is one criterion for determining time windows.

A three step optimisation is underdone. Possible train running times, train separation constraints and velocity restrictions build constraints to the solution space.

In the first step the set of the regarded sections is limited to those with restrictive train concurrency constraints, which are the places where train sequences change (e.g. where trains are leaving, coming on or changing orders). With this the number of variables, constraints and therefore, the computation time can be decreased substantially.

Paths of following trains are constructed differently to crossing paths in a second step, because every track detection section contained has to be regarded in order to avoid interlocking green periods while for trains driving in different directions only the section with the crossing is restrictive.

During the first two steps regarding the constraints for each train time paths with minimal summed energy consumption are determined. Within the third step the corridor with its time windows is created. Constraints are used again, to ensure that the solution of the path construction lies inside the corresponding envelope's corridors, each. With this the drivability of the envelope is reached.

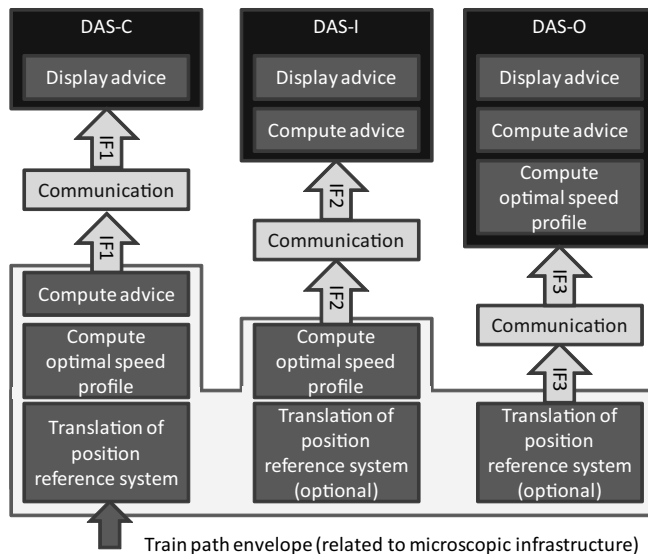


Figure 4: Architectures for communication with DAS on-board devices. [Alb13]

To compute energy optimal, drivable paths an evaluation of possible running times and their energy consumption is necessary. These prerequisites to the optimisation process are done in pre-computation steps using a microscopic train running simulation to determine running times and a DAS optimisation algorithm to evaluate energy consumptions in dependence of running time and velocity at start and destination. Data acquired with these are used as support for an interpolation during the optimisation.

With this module a near real-time construction of TPE is reached, whose train corridors can be provided to Driver Advisory Centrals.

Driver Advisory Central – On-Board device

The computed train path envelope (TPE) can be transferred to the DAS central, which could lie in the hands of an EVU, which now has the task to send an advice to the driver.

To gain such an advice out of the TPE beside the optional translation of position references three major steps are to be done. At first an optimal speed profile which lies inside the given TPE is computed. Afterwards advice can be generated and displayed to the driver. After each of these steps a transfer from the central to the train might follow, from what three kinds of intelligence distributions follow.

Each of these architectural approaches (see Figure 4) comes with its own possibilities, restrictions and requirements for advice representation and technical configuration of used hardware modules.

DAS-C (Central) is the solution with least intelligence on-board, where only a device to display the advice is needed. Therefore the network load will consist of small packages which

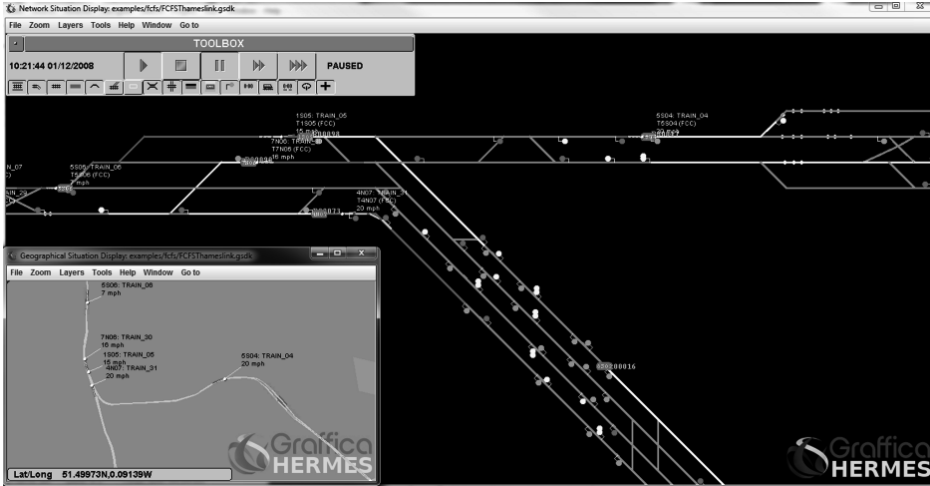


Figure 5: HERMES simulator display.

have to be updated regularly or in one bigger package containing a set of advice together with information when each advice becomes valid. The AF system working in Lötschberg base tunnel corresponds to this type of architecture.

DAS-I (Intermediate) describes the way of “Zuglaufregelung” by Deutsche Bahn where advice computation is made on-board, while the optimal trajectory is computed centrally. To reach a low network load the trajectory can be described as a sequence of time, position, speed points enclosing driving regimes which should be applied in between.

Those both architectures have the drawback that to detect or handle deviations from the optimal trajectory the train status which is available on-board has to be transmitted to the centre, because only there the optimal trajectory can be compared to the train’s behaviour.

The third architecture DAS-O (On-Board) does not have this disadvantage, because all computations are carried out on the on-board device, which therefore, has to possess significant computational power.

4 Demonstration Concept in ON-TIME

The developed interfaces and communication gateways will be tested in the railway operation simulator HERMES (a quick impression provides figure 5), which is provided by the English company Graffica.

Using different scenarios of double track as well as single track lines, high stressed knots and low demand regions, dealing with both passenger and freight transport the effectiveness of the implemented algorithms will to be quantified.

In a first step the modules are tested using a proprietary interface, while for a second step the open interface using HTTP communication is built. Concluding, this interface shall be used to connect to an ANSALDO Traffic Control System.

5 Conclusions

The Project runs until October 2014. On the Innotrans 2014 results, including the demonstrator will be presented.

The open architecture of the developed middleware engages further development of algorithms and applications and aims on building standardised open interfaces out of the project outcomes to enable the connection of a wide range of traffic control systems with actual modules for rail traffic planning and management.

6 Acknowledgements

This work is part of the EU project ON-TIME (Optimal Networks for Train Integration Management in Europe) under the grant agreement FP7-SCP01-GA-2011-285243 which is co-funded by the European Commission within the Seventh Framework Programme (2007-2013).

References

- [Alb13] T. ALBRECHT: “Projekt ON-TIME: Ansätze für ein modularisiertes Verkehrsmanagement bei Eisenbahnen”. In: *EIK - Eisenbahningeurkalender 2014* (2013), pages 279–288.
- [Ick07] L. ICKERT, U. MATTHES, S. ROMMERSKIRCHEN, E. WEYAND, J. LIMBERS, and M. SCHLESINGER: *Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050*. Schlussbericht. Basel, 2007.
- [Jae13] B. JAEKEL and T. ALBRECHT: “Interfacing Conflict Resolution and Driver Advisory Systems in Railway Operations”. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems 2013*. Edited by T. ALBRECHT, B. JAEKEL, and M. LEHNERT. Dresden: TUDpress, 2013, pages 333–343. ISBN: 978-3-944331-34-8.
- [NTT13] NTT DATA: *Architecture specification and integration requirements*. Technical report. On-Time Project, 2013.
- [ONT13] *ON-TIME Project Website*. 2013. URL: <http://www.ontime-project.eu/> (visited on 03/24/2014).

Corresponding author: Birgit Jaekel, Technische Universität Dresden, Faculty of Transport and Traffic Sciences “Friedrich List”, Chair of Traffic Control and Process Automatisations, phone: +49 351 463-36786, e-mail: birgit.jaekel@tu-dresden.de

Comparative Analysis of Algorithms and Models for Train Running Simulation

Birgit Jaekel, Thomas Albrecht

Technische Universität Dresden

The paper was published at *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 4.1–2 (2014), pp. 14–27, doi:10.1016/j.jrtpm.2014.06.002. Elsevier, 2014.

Abstract

In order to find an algorithm applicable for train running time simulation in timetabling and real-time control applications (conflict detection and resolution, driver advisory system), three state-of-the-art algorithms for running time computation are compared concerning calculation imprecisions and computation times which are the main requirements in those computations. Therefore the exact solution of the differential equation of movement of the infinitesimal calculus is compared with those of the numeric approximations by EULER's method and GAUSS quadrature. A case study on German real-world tracks using three modern train configurations is performed. Additionally, the influences of mass modelling as mass strap or mass point and the possibility to emulate the mass strap behaviour by using a pre-computed slope profile is examined. Furthermore the influence of the detailedness of slope profiles on computation times and accuracy is analysed and a method which can be used for reducing the grade of detailedness of pre-computed slope profiles is shown. It is illustrated that high precision computations can only be carried out, when it is acceptable to use more computation time. In this context, the results reveal that this conflict of objectives can be solved by using a correctly parametrized EULER's method, which can be used for all applications under examination as it offers a good trade-off between calculation time and preciseness.

Keywords: Algorithms, Computational methods, Error estimation, Modelling errors

1 Introduction

1.1 Motivation

Since the early twentieth century, train running simulation has been a field of research in particular for timetabling, see [Brü11] for a short summary of the history. As timetabling is a very long process usually taking several months, there are no relevant computational

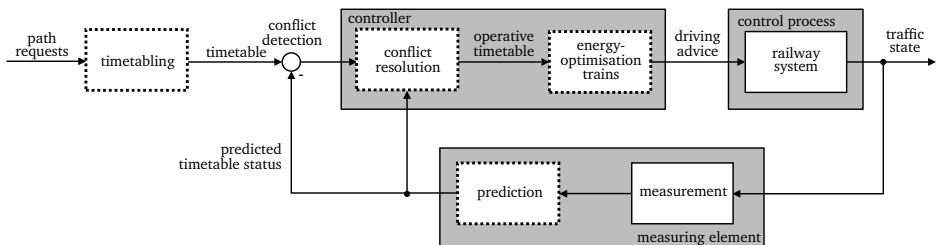


Figure 1: System graph; bold dotted boxes: blocks with use of running time calculation.

requirements on running time simulation for this purpose. The obtained timetable which includes running time supplements represents a constraint for operation. Feedback from operation on a timetable is usually only given, if these constraints are not feasible during operation.

Today, train running simulation is also used for other related tasks, e.g. in

- dynamic traffic management algorithms to determine the consequences of dispatching decisions (e.g. delays of trains) also known as conflict detection and resolution, see [Cor11; DAr07; Rod07; Weg05] or [Tör06] for an overview. This task has very high requirements on computation time, as usually many different train runs have to be computed in very short time.
- driver advisory systems for energy-efficient driving (DAS). They have high requirements on the accuracy of simulation results in order to actually achieve the desired effects of energy-saving and to obtain high user acceptance. As computations are usually carried out on mobile units with limited computational power, computational requirements are also significantly higher than for timetabling (see [Alb05; How95; Kra81; Lüt09]).

These real-time systems are used in the railways in order to improve operation quality by predicting or controlling railway traffic with a high precision. Therefore, they calculate internally with a time precision of usually 1 s [Alb05; DAr07]. Because errors, imprecisions or inconsistencies in train running simulation might lead to train path conflicts or delays in reality, these would not only contradict the original goals of the systems, but also create mistrust among the human operators like dispatchers, train drivers interacting with these systems.

The European research project ON-TIME (Optimal Networks for Train Integration Management in Europe [ONT13]) aims at an integrated cascading control loop of railway operation, in which centralised traffic management systems are coupled with on-board driver advisory systems to further increase capacity (see Figure 1).

It can be seen, that running time simulation plays a role at different process stages. As the timetabling process and both kinds of real-time systems shall work together seamlessly, a compatible train running simulation module is needed which fulfils both requirements of computation velocity and accuracy.

Unlike previous publications in the field, we try to systematically compare algorithms and models on real-world scenarios. The paper analyses different train and track models and the way, the differential equations of motion are solved for some reasonable combinations of them. Computational experiments are carried out to measure computation time and quantitative differences between the results, in particular for times at defined positions (which are needed for the computation of blocking times in the dispatching process), but also for velocity and energy related differences.

1.2 Requirements

A train running simulation has to calculate different physical measures. For timetabling purposes, usually the minimal running time is simulated. Therefore, it must be assured that the train velocity never exceeds the maximal velocity and that the train stops at the planned locations. Earliest arrival times at stations and passing times at intermediate stations are also evaluated for planning purposes. Furthermore, blocking times [Pac08] – for example signal passing and section release times – need to be computed. DAS applications require additional timing and velocity information on places where velocities or driving regimes (acceleration, braking, coasting, cruising) change.

The traction energy consumption and the potential energy recuperation is needed for DAS applications in order to evaluate different driving styles. For timetabling or dispatching applications, it could also be of use to estimate the energy consumption of different timetables or dispatching decisions (see [Alb09]). It should be noted that instantaneous power as needed by tools for the simulation of the electric power supply is not considered here.

To meet the requirements of both, dynamic traffic management systems and DAS, an algorithm for train running time calculation is needed, which delivers a good trade-off between precision and computation times. If no such algorithm is available different will be used for timetabling, prediction and real-time rescheduling which could lead to scheduled times which are inconsistent to times computed in prediction and might therefore lead to false positive or false negative conflict detection. Furthermore conflict solutions given by real-time rescheduling algorithms might not be drivable and therefore cause further conflicts. This could lead the rescheduling to be at least partly counterproductive.

2 Models

For train running simulation the behaviour of the train on the track has to be modelled properly. Thereby appropriate modelling enables several methods for computing this simulation.

The movement of a train is primarily affected by three forces, which are train running resistance F_R , track resistance F_H and propulsion force F_Z which can be modelled in different ways.

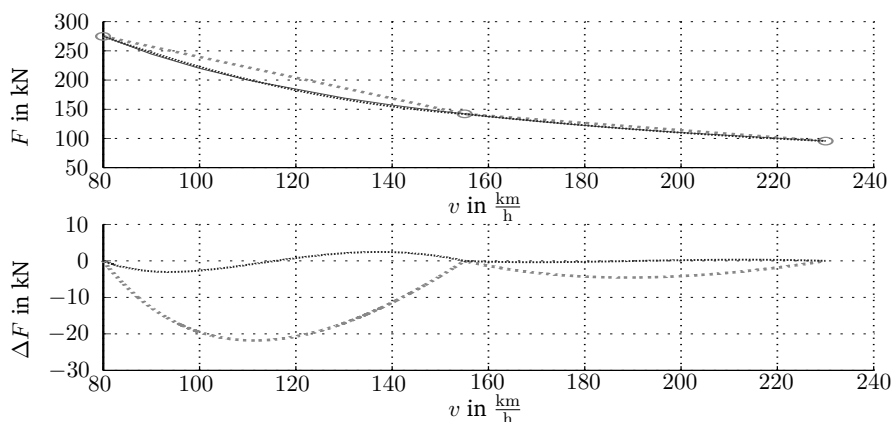


Figure 2: Comparison of tractive effort models; solid: hyperbolic, dashed: linear, dotted: parabolic; absolute values and residues ΔF of approximated functions towards ideal hyperbolic behaviour.

2.1 Train running resistance model

The most important part of the running resistance, which works against the movement of vehicles is air resistance which is quadratically dependent on train velocity and also depends on wind force and direction. Rolling resistances e.g. caused by friction between bearings and axle or wheel rim and rail also occur. There are different models for both categories, which are explained in detail in [Brü11; Roc00; Wen03]. It is commonly agreed that all running resistances can be summarised with the DAVIS-formula and be modelled as polynomial with three parameters c_0 , c_1 , \tilde{c}_2 and train mass m

$$F_R = \tilde{c}_2 v^2 + m(c_1 v + c_0) \quad (1)$$

$$= m(c_2 v^2 + c_1 v + c_0). \quad (2)$$

Air resistance, which is modelled with parameter \tilde{c}_2 , does not depend on the train mass but for computational reasons it is modelled as mass dependent coefficient $c_2 = \frac{\tilde{c}_2}{m}$. Therefore, the original non-dependent parameter is divided by the train mass. It should also be noted that the parameters c_2 and c_1 depend on wind velocity and, therefore, vary with different wind directions and forces encountered during a train run, but will be regarded as constant for this study.

2.2 Tractive effort model

The tractive effort of an electric vehicle at low velocity is limited by the maximal slip between wheel and rail which follows a shifted hyperbolic in dependence on train velocity (see [Wen03]). Beyond a changeover velocity the tractive effort is inversely proportional to the train velocity and thus hyperbolic as well. To find a usable description of the tractive effort

a compact presentation which provides the information as exact as possible is needed. The theoretic exact (shifted) hyperbolic traction force function $F_{\text{hyperbolic}}(v) = \frac{P}{v-v_0}$ (P constant power, v_0 shifting parameter) would fulfil these requirements, but in most cases tractive effort data is only given as a set of velocity-tractive-effort points. Moreover with the use of the shifted hyperbolic function and the quadratic running resistance function in each computational step one would need to numerically determine the roots of a third grade polygon and also had to compute several logarithms and arcus functions which would lead to an extensive need for computation time.

Table 1: Comparison of traction force models; $rmse_{\text{lin}}$: root mean square error between hyperbolic and linear function, $rmse_{\text{parabolic}}$: root mean square error between hyperbolic and parabolic function.

pitch in $\frac{\text{km}}{\text{h}}$	$rmse_{\text{lin}}$ in kN	$rmse_{\text{parabolic}}$ in kN
50	9.7898	0.6130
75	16.205	1.9726
150	33.471	6.4665

So an approximation has to be made, e.g. build a linear polygonal chain out of the given velocity-traction-force points. That model based on linearisation is also part of the widely used RailML-rolling-stock model (see [rML13]). Alternatively the approximation with a parabolic spline function can be used. Figure 2 exemplarily shows the hyperbolic traction force function, an approximating parabolic for calculation description) with minimal mean square error and the polygonal chain with its residues (both with non-optimised uniformly scaled support points). The example is given for a constant pitch of 75 km/h between the sample points. In table 1 the root mean square errors of both models are given for different pitch sizes. It can be seen, that the quadratic model leads to functions which are for the same number of support points closer to the real-world behaviour. The number of points needed to describe the model can, therefore, be reduced. Moreover, a computation of a train run with use of the traction force as parabolic spline will be more exact than one with the linearised model because of the tendency of the polygonal chain to overestimate the traction force. An optimal choice of support points instead of uniformly scaled ones would improve the exactness and, therefore, reduce the needed number of points of both modelling variants, but lies out of the scope of this paper. For the further parts of the paper modelling the tractive effort with a quadratic spline is chosen, so that on a section between two consecutive support points holds

$$F_Z = m\rho(\tilde{a}_2v^2 + \tilde{a}_1v + \tilde{a}_0) \tag{3}$$

$$= m(a_2v^2 + a_1v + a_0). \tag{4}$$

The train mass is increased by multiplying with ρ to include forces used for accelerating rotating masses. This factor is contained in the polynomial coefficients a_0 , a_1 and a_2 .

2.3 Track model

Depending on the layout of the track, further external forces affect train movement. The most significant is related to the slope of the track in the direction of movement.

For a constant slope α , slope resistance can be computed with

$$F_{\text{H}} = mg \sin \alpha \approx mg \tan \alpha. \quad (5)$$

Curve and switch resistance as well as resistances resulting from transition curves are other track resistances. They depend on track geometry (mainly radii) and train construction (axle distances), but are usually small compared to slope resistance. Track resistances do not depend on train velocity.

The height profile of a track is a continuous function, however the slope itself is not continuous along a line: there are track parts with constant slope, vertical curves with constant radius and transition curves. In practice, information about track layout is taken from Geographical Information Systems (GIS) which are used widely in the railways. In these systems, the exact geometrical layout of the track is approximated with a series of points connected with straight lines, e.g. one height point every 10 m along a track. Alternatively, measuring the height profile during the train run has become possible (see [Tho11]).

In the literature on train running dynamics [Wen03], it is recommended to reduce the amount of detail in the height profile to sections of constant slope with a defined minimum length. For data from GIS or measured height profiles, the following method is proposed to do this (see [Tho11] for details): The slope sequence is divided into track sections within which the slope is regarded constant. For reasons of driving dynamics, track slope profiles are supposed not to contain pairs of sections whose slope differences go below a specified minimum. The same holds for the observance of a specified minimum section length (see [Wen03]). Under the assumption that a discrete height profile is given, these requirements can be fulfilled in three steps.

The height curve's first to third derivation are calculated and the derivations' zeros, minima and maxima are chosen as limits of sections of constant slope.

The original height curve is replaced with the new curve that contains the height values at the chosen data points only and whose slope values can be computed between each two consecutive points. No other measurement points are kept. This process lowers the amount of sections of the track profile.

In the next step, sections whose length is below the specified minimum length Δd_{min} are merged in the following way:

Let x_n, x_{n+1}, x_{n+2} be three consecutive support points defining two neighbouring track sections, $d(x)$ be the distance value of a track point x and $\Delta d(x, y)$ be the difference of the distance values of two track points x and y .

$$\Delta d(x_n, x_{n+2}) = \Delta d(x_n, x_{n+1}) + \Delta d(x_{n+1}, x_{n+2}). \quad (6)$$

Track sections are merged, if one of these inequalities holds:

$$\Delta d(x_n, x_{n+1}) < \Delta d_{\min}, \quad (7)$$

$$\Delta d(x_{n+1}, x_{n+2}) < \Delta d_{\min}. \quad (8)$$

In that case track point x_{n+1} is not taken into account for the slope calculations any further. It should be noted that slope differences are not considered in this step, therefore, it should only be applied for height profiles which apparently contain too many sections, e.g. due to measurement errors.

In the final step of the processing of slope values, slope differences between neighbouring track sections which are smaller than a chosen minimum slope Δh_{\min} are eliminated. If the difference of the slope values of two neighbouring sections $\Delta h(x_n, x_{n+1})$ is smaller than the defined minimum, these sections are merged and their new, common slope value is calculated:

$$\Delta h(x_n, x_{n+1}) < \Delta h_{\min} \quad (9)$$

with

$$\Delta h(x_n, x_{n+1}) = h(x_{n+1}) - h(x_n). \quad (10)$$

Figure 3 shows the result after the realisation of the specification of the minimum track section length and the merging of similar slopes applied to a height profile from multiple GPS barometer measurements (see[Tho11]). In the remainder of this paper, the parameters for slope simplification will be noted as $d_{\min} - h_{\min}$. So $0 - 0$ stands for the original profile and $\infty - \infty$ for a profile with a single (mean slope) section.

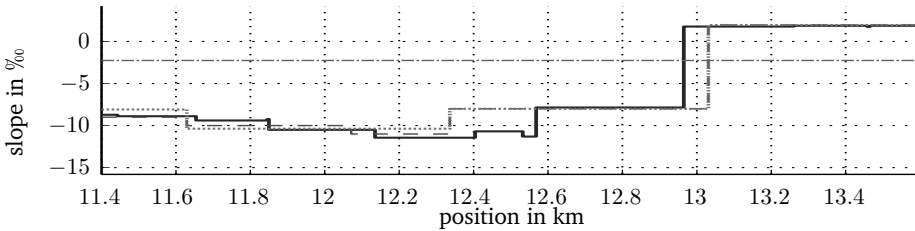


Figure 3: Influence of simplification parameters on slope profile for solid: original profile 0-0, dashed: 100-0.5 and dotted: 250-1, dash dotted: $\infty - \infty$.

2.4 Mass model

Train as mass strap

A train's mass is distributed over the length of the train and as the slope resistance F_H depends on the mass, this distribution has to be regarded over all track sections underneath the train

to gain a more exact value for track slope resistance and, therefore, for train running times. With $h_i = \tan \alpha_i$ as constant slope of section i and m_i , the train's mass over this section, l_i denoted as the train's length over a section i and x_a as the position of the train's head the effective slope resistance, which effects a train at a certain moment is

$$F_H = g \sum_{i=1}^n (h_i m_i) = g \sum_{i=1}^n (h(x_i) m_i) = g \sum_{i=1}^n (h(x_a - \sum_{j=1}^i l_j) m_i) \quad (11)$$

with n as the number of sections underneath the train. Figure 4 shows the resulting F_H for different train lengths under the assumption of an equally distributed train mass.

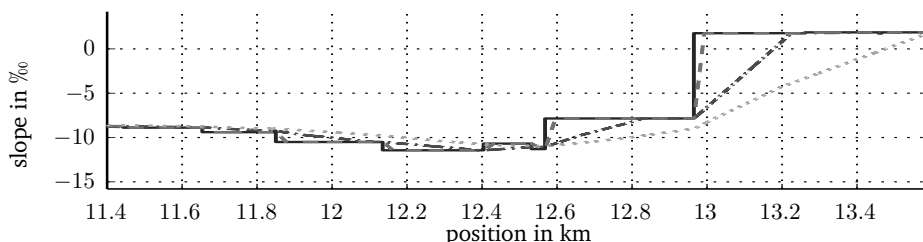


Figure 4: Influence of train length on effective slope profile for solid: mass point model, dashed: 27 m mass strap; dashed-dotted: 260 m mass strap and dotted: 628 m.

Train as point mass

Assuming the train's mass concentrated in one point will lead us to a mass point model, which is widely used in calculation of driving dynamics. At trains composed of rail cars the mass centre is near the middle of the train while in other cases it can be shifted towards the locomotive.

2.5 Aggregation of models

Modelling the forces that affect the train run in this way provides us the possibility to sum F_Z , F_R and F_H on intervals where all of them are defined as a continuous quadratic polynomial. For tractive effort there changes are given in the spline at certain velocities and for slope force are changes with their positions, which will mark the end of such an interval.

$$F_T(v) = F_Z(v) - F_R(v) - F_H(s) \quad (12)$$

$$= m \left[(a_2 - c_2)v^2 + (a_1 - c_1)v + a_0 - c_0 - g \sin \alpha \right] \quad (13)$$

$$= m(\gamma v^2 + \beta v + \alpha)$$

$$= ma(v). \quad (14)$$

The initial value problem of the train movement modelled as a point mass reads as

$$\frac{dv}{dt} = \gamma v^2 + \beta v + \alpha, \quad v(0) = v_0. \quad (15)$$

It is

$$s(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau + s(0), \quad s(0) = s_0. \quad (16)$$

As bounds are given as velocities or positions it is necessary to compute the driving time in dependence of start and end velocities or start and end positions.

3 Methods for solving the differential equation of movement

For solving the differential equation system of movement (15) several approaches have been published. Beside of the analytic solution numerous numeric approaches are known. Some of those base on time, position or velocity step methods for differential equation solving while others solve its (speed based) reformulation as integral equation.

In this paper three common approaches for solving the differential equation of movement or its reformulation as integral equation are compared, which are:

1. the method by infinitesimal calculus proposed in [Sch11],
2. a discrete time step EULER-method (RUNGE-KUTTA 1) as proposed in [Wen03] and
3. solving the differential equation with GAUSS-quadrature as proposed in [Brü11].

Further approaches like:

4. other RUNGE-KUTTA-methods,
5. numerical macro step algorithms like SIMPSON-method (see [Wen03]) or
6. position or velocity micro-step EULER(-like)-methods (described in [Wen03], too)

are not in the scope of it as these methods are quite closely related to the former ones or not as common as the former ones.

The selected approaches are used under a mass point train model and as an addition it will be examined whether the algorithms are suitable to fit a mass strap model in the last part of the section.

3.1 Infinitesimal Calculus

Besides solving the differential equation of motion numerically it is possible to solve it analytically by infinitesimal calculus, see [Sch11]. Separation of the variables in Equation (15) yields

$$\int \frac{1}{\gamma v^2 + \beta v + \alpha} dv = t. \quad (17)$$

Let $\nabla = 4\alpha\gamma - \beta^2$, so (17) can be resolved as given in [Mer99]

$$t(v) = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{\nabla}} \arctan \frac{2\gamma v + \beta}{\sqrt{\nabla}} & \nabla \neq 0, \\ \frac{-2}{2\gamma v + \beta} & \nabla = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Please note, ∇ is possibly negative, so calculation within the body of the complex numbers is necessary. For $v(t)$ follows

$$v(t) = \begin{cases} \frac{1}{2\gamma} \left(\sqrt{\nabla} \tan \frac{\sqrt{\nabla} t}{2} - \beta \right) & \nabla \neq 0, \\ -\frac{1}{\gamma} \left(\frac{1}{t} + \frac{\beta}{2} \right) & \nabla = 0. \end{cases} \quad (19)$$

$s(t)$ is given by the integral of velocity over time.

$$s(t) = \begin{cases} -\frac{1}{2\gamma} \left(2 \ln \left(\cos \frac{\sqrt{\nabla} t}{2} \right) + \beta t \right) & \nabla \neq 0, \\ -\frac{1}{\gamma} \left(\ln t + \frac{\beta t}{2} \right) & \nabla = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Times and positions in dependence of velocities at start and end points are easy to compute, but a function of position in dependence of time is not analytically solvable. Therefore, times at given positions s_{target} have to be determined by the use of a root-finding algorithm over $s(t_0, t) - s_{\text{target}} = 0$, where $t_0 = t(v_0)$. The algorithm chosen (proposed in [Got10]) is a fast regula-falsi method with a combination of bisection and direct quadratic approximation (called BDQRF).

Equation (21), the solution of the initial value problem stated above is given with

$$t(v_0, v) = t(v) - t_0, \quad (21)$$

$$s(t_0, t) = s(t + t_0) - s(t_0). \quad (22)$$

The energy used to transfer a train from state (s_0, v_0, t_0) to state (s_1, v_1, t_1) is composed of the difference of kinetic energies of the velocities of the two status v_0 and v_1 , the difference in potential energy depending on the height difference $h(s_1) - h(s_0)$ and the energy used to overwhelm the resistance forces.

Energy consumption can be computed with

$$E = \int_{t_0}^{t_1} F_Z(v(t))v(t)dt \quad (23)$$

$$= m \int_{t_0}^{t_1} (a_2 v(t)^2 + a_1 v(t) + a_0)v(t)dt. \quad (24)$$

With Equation (19) we obtain

$$\begin{aligned}
 E = \frac{m}{(2\gamma)^3} & \left[a_2 \nabla \left(\tan \frac{\sqrt{\nabla} t}{2} \right)^2 \right. \\
 & + 2\sqrt{\nabla} (3a_2\beta - 2a_1\gamma) \tan \frac{\sqrt{\nabla} t}{2} \\
 & + \left((\nabla - 3\beta^2) a_2 + 4a_1\beta\gamma - 4a_0\gamma^2 \right) \ln \left(\tan \left(\frac{\sqrt{\nabla} t}{2} \right) \right)^2 \\
 & \left. + \left((\beta^3 - 3\nabla\beta) a_2 + (2\nabla - 2\beta^2) a_1\gamma + 4a_0\beta\gamma^2 \right) t \right]_{t_1}^{t_2}. \tag{25}
 \end{aligned}$$

3.2 Explicit time-step-EULER-method

A widely known method for solving the differential equation of movement is the explicit time step EULER-method which is based on a piecewise constant acceleration. It is the most simple RUNGE-KUTTA-method (of order 1).

A forward computation for given initial values (t_0, v_0) and a time pitch Δt

$$v_i = v_{i-1} + a(v_{i-1})\Delta t \tag{26}$$

has to be computed. Furthermore hold

$$t_i = t_{i-1} + \Delta t, \tag{27}$$

$$s_i = s_{i-1} + v_{i-1}\Delta t + \frac{a(v_{i-1})}{2} \Delta t^2. \tag{28}$$

For a backward computation hold

$$v_{i-1} = v_i + a(v_i)\Delta t, \tag{29}$$

$$t_{i-1} = t_i - \Delta t, \tag{30}$$

$$s_{i-1} = s_i - v_i\Delta t - \frac{a(v_i)}{2} \Delta t^2. \tag{31}$$

These computation steps of forward or backward computation are to be continued until the exit condition $v_i \geq v_{max}$ or $s_i \geq s_{max}$ and $v_i \leq v_{min}$ or $s_i \leq s_{min}$, respectively, is reached. Δt should then be set to the value given with the exit condition. The method is of order one, which means the global discretisation error (the difference between solution and approximated value summed over all steps) grows linear with Δt , so big pitches lead to big errors.

The energy consumption will be stepwise estimated with

$$E = (ma + F_R + F_H)\Delta s = F_Z\Delta s.$$

3.3 GAUSS-LEGENDRE-quadrate

Equation (17) in the borders of velocity v_s and v_e can be solved using the GAUSS-LEGENDRE-quadrate. The key idea of the numerical integration is the approximation of the integrand with an easy to integrate function, mostly a polynomial. With use of the LAGRANGE form

$$L_k^{(n)} := \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^n \frac{v - v_j}{v_k - v_j}, \quad k = 0, \dots, n \quad (32)$$

and $n + 1$ pairwise different support points (control points) v_i ($i \in \{0, \dots, n\}$) holds

$$I(f) = \int_{v_s}^{v_e} f(v)dv \approx \int_{v_s}^{v_e} p_n(v)dv = \sum_{i=0}^n f(v_i) \int_{v_s}^{v_e} L_i^{(n)}(v)dv. \quad (33)$$

The integrals of the equation's right side only depend on the support points and, therefore, are identically pre-computable for all polynomials p_n of grade lower or equal n . One can interpret these integrals as weights $w_i = \int_{v_s}^{v_e} L_i^{(n)}(v)dv$, so that

$$\int_{v_s}^{v_e} p_n(v)dv = \sum_{i=0}^n f(v_i)w_i. \quad (34)$$

A numerical quadrature of grade n is always of at least order $n + 1$, which means it exactly integrates polynomials until grade n . This order can be increased by a skilful choice of support points until its maximum of $2n + 2$.

If the support points v_0, \dots, v_n are roots of a LEGENDRE-polynomial the order will be maximal. Generally, the roots n_i of those polynomials have to be approximated numerically. As the roots are in the interval $[-1, 1]$ one has to map them with

$$v_i = \frac{(v_s + v_e) + n_i(v_e - v_s)}{2} \quad (35)$$

to the chosen interval $[v_s, v_e]$.

Because all weights are positive the GAUSS-quadrate is numerically stable and converges even with increasing polynomial grade towards $I(f)$. The errors arise from the integration of the error of LAGRANGE-interpolation (see [Bie01; Ric12; Tör90]).

The GAUSS-quadrate can also be used on the integral of Equation (23) above for the energy consumption computation.

3.4 Methods for use with mass strap model

The type of mass modelling has no influence on the numerical solving of the differential equation system which we use for the EULER-method. The typical computation steps remain in type and number, but for the estimation of the acceleration the term (11) will be added instead of the constant value.

Unfortunately, the resulting differential equation which describes the dynamics of train movement under mass strap modelling refuses analytical solving (see [Wen91]). So a numerical method for the problem described above has to be used.

GAUSS-quadrature will also be not appropriate because of the need to gain a single-variable-integral equation out of the differential equation.

Another possibility, whose practicability shall be estimated here, is pre-computing an effective slope profile with the use of the mass strap model followed by the computation of the running time using the mass point model. Therefore, the effective slope resistance after formula (11) will be computed in steps of one metre assuming equipartition of the train's mass. Afterwards an optional simplification of the gained profile using the algorithm described above can be carried out. Such an effective slope profile with a resolution of one metre in combination with analytical solving is to be the reference solution for our comparison and will be assumed as exact.

4 Case Study

To get comparable results, the methods described before will be used on several real-world tracks with a few typical train types each. The impact of the methods' parameters and the scenario characteristic on computation time and errors will be analysed.

It can be expected that the numerical solution of the differential equation needs more function evaluations than the quadrature solution to reach a similar exactness. But, as described in section 2.5 points of the gradient profile or the tractive effort force the division of the differential equation into a piecewise defined function. Therefore the more evolved methods like the quadrature or higher order RUNGE-KUTTA methods might not fully play out their advantages, because they are forced to do more function evaluations, too. Furthermore, as seen in section 3 function evaluations done by the quadrature method and the analytical method are more complicated than the one by EULER's-method and therefore more time consuming. Hence, the interaction between gradient profile and solutions methods shall be evolved, to clarify whether the exactness provided by the analytical solution or GAUSS-quadrature is needed and whether the computation time could be lowered without a severe loss of accurateness.

4.1 Scenarios

Example Tracks

To evaluate the applicability of these algorithms in an environment of practical relevance it is irremissible to use them on real-world tracks. In this paper, we have decided to use some tracks of a German regional network of about 10, 20 and 60 km length and minimal running times up to 2000 s with their real velocity-restriction-profiles and their slope profiles which were gathered for the application of a DAS [Alb12]. The height profiles and maximal velocities are given in Figure 5. The most detailed gradient profile has a mean distance

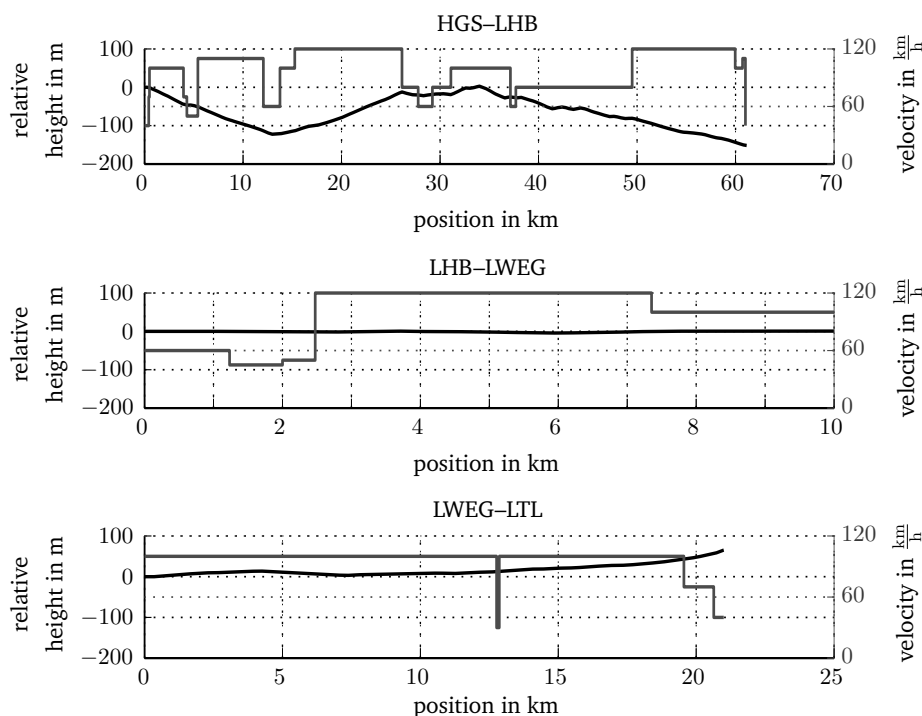


Figure 5: Height profiles and velocity restrictions of the used tracks; HGS-LHB: Goslar-Halberstadt, LHB-LWEG: Halberstadt-Wegeleben, LWEG-LTL: Wegeleben-Thale.

between two slope changes of 122 m while the least detailed has a mean distance between two slope changes of about 1500 m.

Rolling stock

Three different train types were used for the analysis to work out train parameter induced effects. A typical IC train configuration consisting of one locomotive and 9 passenger cars and a small Diesel multiple unit train (DMU) are examined as representatively for passenger trains. As this DMU has a less forceful acceleration it is possible to examine effects of different propulsion forces. To determine the effects of the train length a third train is used which is in contrast to the first two a long and heavy freight train (HFT). For the behaviour of those trains on the tracks regarding the effective gradients refer to Figure 4. The most relevant train parameters are summarised in table 2. Figure 6 gives sample trajectories for the IC and the freight train on the different tracks. For each train individual acceleration and braking curves are used modelled with piecewise defined acceleration functions of 3-5 pieces and braking functions of 6 pieces for IC and two for the other train configurations.

Table 2: Overview of train parameters.

	DMU	IC	HFT
length in m	27.26	259.7	628
weight in t	49	653	2083
maximum velocity in $\frac{\text{km}}{\text{h}}$	150	235	110
power in kW	940	5600	8750

4.2 Methodology

Precision and computation time of the different methods depend to a large extent on the scenario where the method is applied. In order to decide for a suitable method, they need to be checked for different trains (long, short) on different tracks with different characteristics, hilly and flat.

Therefore, a computer tool was developed which was able to import different tracks, timetables and train models in railML-format (see [rML13]). Using the same framework to divide into sections where maximal braking, coasting or maximal acceleration (see figure 7; similar to [Brü11]) should be applied and to adhere speed restrictions, only the implementations of the methods for solving the differential equation of movement were replaced by the use of interface implementations. Phases of maximal traction are computed forward from actual to maximum velocity and minimal traction (braking) phases are computed backward from the new low speed restriction to the former higher one. When a velocity restriction is reached the computation of a phase is ended. In the frame computation, if necessary also interceptions between two of these phases are computed and parts belonging to none of these phases are filled using a constant cruising speed.

The different methods for solving the differential equations of motions were implemented in C# using the standard math and complex math functions provided by the .NET-Framework version 4.0. Early tests have shown, that the computation time is significantly higher for comparable operations with the complex math library. Therefore, it is preferable to first check whether the complex space is needed (see Equations 18 and 19) and work in the space of the real numbers if not. This has been implemented for the analytical solution approach (refer to Section 3.1).

It should be noted, that for EULER'S-method compared to all other examined methods more intermediate points had to be computed, but the function which therefore has to be evaluated is less complex than the one used GAUSS and analytic solution, because it is based on the acceleration while the other two methods use the function implicitly given as the integrand in 17 respectively 18 to 20. Therefore the number of function evaluations cannot be used as a measure for computation time, but for algorithms efficiency. As we are interested in the performance of the algorithms in our special application computation times were determined using the C# stopwatch, with a resolution of about $0.3 \cdot 10^{-6}$ s. In each scenario, 1000 calculations were made and the mean computation time was taken.

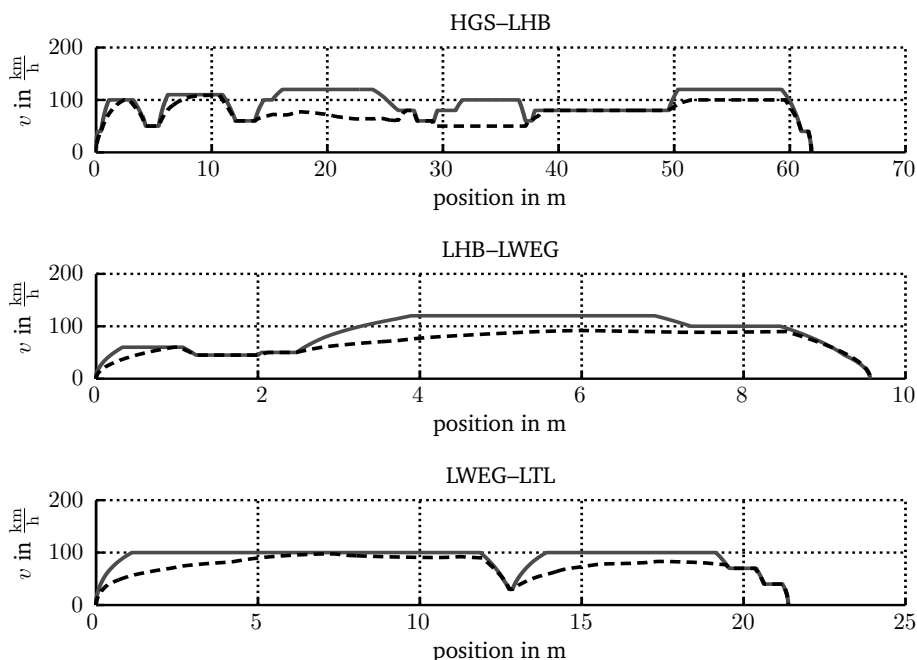


Figure 6: velocity-position-graphs of runs over the examined tracks; solid: IC, black: HFT.

The computations were done on a 64-bit Microsoft windows personal computer with 3.1 GHz clock frequency and 2 GB RAM. All required data (velocity and time at signals, section release times and station arrivals, switching points (time, position, velocity) between driving regimes, total energy consumption) were calculated with all examined methods and the computation time was measured.

In order to obtain smoother plots for illustrating the differences, additional intermediate points were computed for all methods in post-processing which were not considered in the computation time measurement.

Each of the methods was simulated on all tracks with both rolling stocks, further with the mass point model on the non-simplified pre-computed effective slope profile containing height information every 1 m and on some simplified pre-computed slope profiles. Mass strap model computations were done for the EULER-method only. All examined methods and parameters are summarised in table 3.

In our consideration the mass point model will be used with the train's head's position taken to place the mass point for reasons of better interpretability of figures later. So compared to the mass centre in the middle the resulting trajectory will be slightly shifted. This simplification has no impact on the results received by the comparison of the different methods.

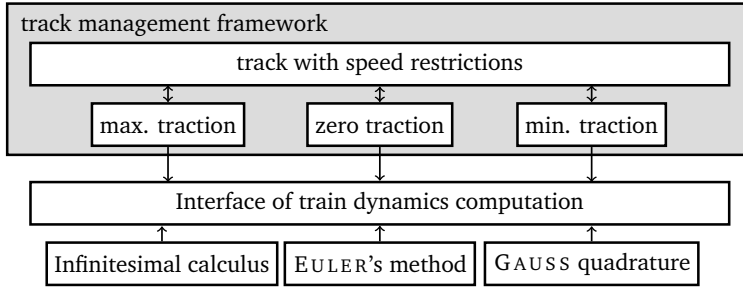


Figure 7: Functional concept of the developed tool.

Table 3: Overview of used models and methods.

methods and parameter	EULER's-method $dt = 0.5 \text{ s}, 1 \text{ s}, 2 \text{ s}, 3 \text{ s}, 4 \text{ s}$ GAUSS-quadrature $n = 0 \dots 4$ analytic solving
tracks	HGS-LHB, LHB-HGS, LHB-LWEG, LWEG-LHB, LWEG-LTL, LTL-LWEG
slope	$\Delta d_{\min} \in \{0 \text{ m}, 100 \text{ m}, 250 \text{ m}, 500 \text{ m}\}$
simplification	$\Delta h_{\min} \in \{0.5 \text{ ‰}, 1 \text{ ‰}, 2 \text{ ‰}\}$
train types	DMU, IC, HFT
mass model	mass point, mass strap, mass strap pre-computation

Methods for determination of computation errors

If x_i is supposed to be the exact value and \tilde{x}_i an approximation of it, we understand as deviation d_i the absolute difference value between the exact and the approximated value $d_i = |\tilde{x}_i - x_i|$. As commonly applied in statistical problems, we consider the mean and maximal values of differences between each two associated values ($|X| = |\tilde{X}| = n$).

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i), \quad \max d = \max_{i=1..n} d_i. \quad (36)$$

As additional measure for the mean deviation we use a variant of the root mean square error, which is the mean square error:

$$\frac{1}{y_n - y_1} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{1}{2} (y_{i+1} - y_i) (x_i - \tilde{x}_i + x_{i+1} - \tilde{x}_{i+1}) \right)^2. \quad (37)$$

Table 4: Acceleration 0-200 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$; mean and maximum deviations from analytic solution for the different algorithms and their parameters.

method	parameter	$\bar{d}_i(v(s))$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\max d_i(v(s))$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\bar{d}_i(t(s))$ in s	$\max d_i(t(s))$ in s
GAUSS	$n = 4$	$7.86 \cdot 10^{-6}$	$2.26 \cdot 10^{-4}$	$1.20 \cdot 10^{-5}$	$2.30 \cdot 10^{-4}$
	$n = 3$	$1.55 \cdot 10^{-4}$	$3.68 \cdot 10^{-3}$	$2.18 \cdot 10^{-4}$	$3.68 \cdot 10^{-3}$
	$n = 2$	$3.19 \cdot 10^{-3}$	$5.82 \cdot 10^{-2}$	$3.98 \cdot 10^{-3}$	$5.63 \cdot 10^{-2}$
	$n = 1$	$6.37 \cdot 10^{-2}$	$7.76 \cdot 10^{-1}$	$7.27 \cdot 10^{-2}$	$7.67 \cdot 10^{-1}$
	$n = 0$	$1.79 \cdot 10^0$	$1.11 \cdot 10^1$	$1.44 \cdot 10^0$	$7.88 \cdot 10^0$
EULER	$\Delta t = 4$ s	$4.02 \cdot 10^{-1}$	$1.60 \cdot 10^0$	$3.30 \cdot 10^{-1}$	$1.04 \cdot 10^0$
	$\Delta t = 3$ s	$2.93 \cdot 10^{-1}$	$1.07 \cdot 10^0$	$2.37 \cdot 10^{-1}$	$7.79 \cdot 10^{-1}$
	$\Delta t = 2$ s	$1.87 \cdot 10^{-1}$	$8.03 \cdot 10^{-1}$	$1.51 \cdot 10^{-1}$	$5.20 \cdot 10^{-1}$
	$\Delta t = 1$ s	$8.81 \cdot 10^{-2}$	$2.04 \cdot 10^{-1}$	$6.96 \cdot 10^{-2}$	$2.60 \cdot 10^{-1}$
	$\Delta t = 0.5$ s	$4.45 \cdot 10^{-2}$	$1.02 \cdot 10^{-1}$	$3.45 \cdot 10^{-2}$	$1.30 \cdot 10^{-1}$

Table 5: Coasting 200-0 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$; mean and maximum deviations from analytic solution for the different algorithms and their parameters.

method	parameter	$\bar{d}_i(v(s))$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\max d_i(v(s))$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\bar{d}_i(t(s))$ in s	$\max d_i(t(s))$ in s
GAUSS	$n = 4$	$4.04 \cdot 10^{-3}$	$3.45 \cdot 10^{-2}$	$1.51 \cdot 10^{-1}$	$1.77 \cdot 10^{-1}$
	$n = 3$	$9.94 \cdot 10^{-3}$	$6.82 \cdot 10^{-2}$	$1.22 \cdot 10^0$	$1.52 \cdot 10^0$
	$n = 2$	$2.70 \cdot 10^{-1}$	$1.48 \cdot 10^0$	$8.49 \cdot 10^0$	$1.01 \cdot 10^1$
	$n = 1$	$7.18 \cdot 10^{-1}$	$4.81 \cdot 10^0$	$3.47 \cdot 10^1$	$5.37 \cdot 10^1$
	$n = 0$	$1.40 \cdot 10^1$	$4.05 \cdot 10^1$	$3.97 \cdot 10^2$	$5.06 \cdot 10^2$
EULER	$\Delta t = 4$ s	$1.90 \cdot 10^{-1}$	$6.42 \cdot 10^{-1}$	$1.02 \cdot 10^0$	$1.78 \cdot 10^0$
	$\Delta t = 3$ s	$1.43 \cdot 10^{-1}$	$4.82 \cdot 10^{-1}$	$7.66 \cdot 10^{-1}$	$1.33 \cdot 10^0$
	$\Delta t = 2$ s	$9.51 \cdot 10^{-2}$	$3.21 \cdot 10^{-1}$	$5.11 \cdot 10^{-1}$	$8.89 \cdot 10^{-1}$
	$\Delta t = 1$ s	$4.75 \cdot 10^{-2}$	$1.61 \cdot 10^{-1}$	$2.55 \cdot 10^{-1}$	$4.44 \cdot 10^{-1}$
	$\Delta t = 0.5$ s	$2.38 \cdot 10^{-2}$	$8.03 \cdot 10^{-2}$	$1.28 \cdot 10^{-1}$	$2.22 \cdot 10^{-1}$

Table 6: Braking 200-0 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$; mean and maximum deviations from analytic solution for the different algorithms and their parameters.

method	parameter	$\bar{d}_i(v(s))$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\max d_i(v(s))$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\bar{d}_i(t(s))$ in s	$\max d_i(t(s))$ in s
GAUSS	$n = 4$	$2.03 \cdot 10^{-7}$	$8.64 \cdot 10^{-6}$	$1.92 \cdot 10^{-7}$	$6.35 \cdot 10^{-7}$
	$n = 3$	$1.12 \cdot 10^{-5}$	$2.91 \cdot 10^{-4}$	$8.79 \cdot 10^{-5}$	$9.29 \cdot 10^{-5}$
	$n = 2$	$2.97 \cdot 10^{-4}$	$6.54 \cdot 10^{-3}$	$4.13 \cdot 10^{-3}$	$4.35 \cdot 10^{-3}$
	$n = 1$	$8.20 \cdot 10^{-3}$	$9.17 \cdot 10^{-2}$	$1.23 \cdot 10^{-1}$	$1.32 \cdot 10^{-1}$
	$n = 0$	$1.17 \cdot 10^{-1}$	$6.13 \cdot 10^{-1}$	$2.59 \cdot 10^0$	$2.91 \cdot 10^0$
EULER	$\Delta t = 4$ s	$1.63 \cdot 10^{-1}$	$6.58 \cdot 10^{-1}$	$2.63 \cdot 10^{-1}$	$9.84 \cdot 10^{-1}$
	$\Delta t = 3$ s	$1.19 \cdot 10^{-1}$	$5.52 \cdot 10^{-1}$	$1.90 \cdot 10^{-1}$	$8.04 \cdot 10^{-1}$
	$\Delta t = 2$ s	$7.45 \cdot 10^{-2}$	$2.58 \cdot 10^{-1}$	$1.20 \cdot 10^{-1}$	$3.30 \cdot 10^{-1}$
	$\Delta t = 1$ s	$3.66 \cdot 10^{-2}$	$1.30 \cdot 10^{-1}$	$5.85 \cdot 10^{-2}$	$1.81 \cdot 10^{-1}$
	$\Delta t = 0.5$ s	$1.80 \cdot 10^{-2}$	$6.52 \cdot 10^{-2}$	$2.84 \cdot 10^{-2}$	$6.14 \cdot 10^{-2}$

4.3 Results

Examination of regimes

The stability of a computation method and its influences in computed times, velocities and energy consumptions for the regimes coasting, acceleration and deceleration were analysed for the IC train. Therefore, very long flat track sections with no changes in between were assumed (e.g. acceleration from 0 to $200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$). All solutions of a regime were modified afterwards to have the same length by adding a cruising phase. The length of this phase affects the energy consumption in particular for the coasting regime. Results for all regimes are summarised in tables 5-6.

The example of coasting shows that deviations can be extensive when constant polynomials are used for interpolation during GAUSS-quadrature. So it cannot be recommended to use GAUSS-quadrature of grade 0. Even the trajectory of grade one begins coasting much earlier (almost 1 km) than any other trajectory and, therefore, has a considerably longer running time and are less energy consuming. Not till $n = 3$ are the mean and maximum computation errors below the ones reached with EULER's-method which are below 2 s and 1 km/h. Cause computation time increases considerably for bigger grades GAUSS-method cannot be approved.

For acceleration the deviations of the considered parameters of the GAUSS-method ($n > 1$) are below two seconds respectively three kilometre per hour and for braking regime below one second respectively one kilometre per hour. Differences in energy consumption amount for all three regimes with $n > 3$ to less than two percent, but as mentioned before coasting takes a special role here. For the other regimes already order $n > 0$ would be adequate to reach the same grade of exactness.

As computation errors of GAUSS-quadrature enlarge with growing section length, this effect can be lowered by splitting those sections. This will make GAUSS-quadrature work like a summed variant of it and, therefore, reduce computation errors. For our examples the section length should not exceed 500 m to 1000 m.

The effects generated by differences in the methods can be observed in similar ways for the other trains, too.

Influence of the used method on computation times

The computation time over a track depends on several factors, which are for each of the algorithms

- the amount of changes in slope,
- the amount of changes in velocity restriction and
- the amount of changes in tractive effort of the velocity-spline.

These have less effect on the EULER's method than on the both other algorithms because of the design of the first as a step method. The number of steps of a time step method depends

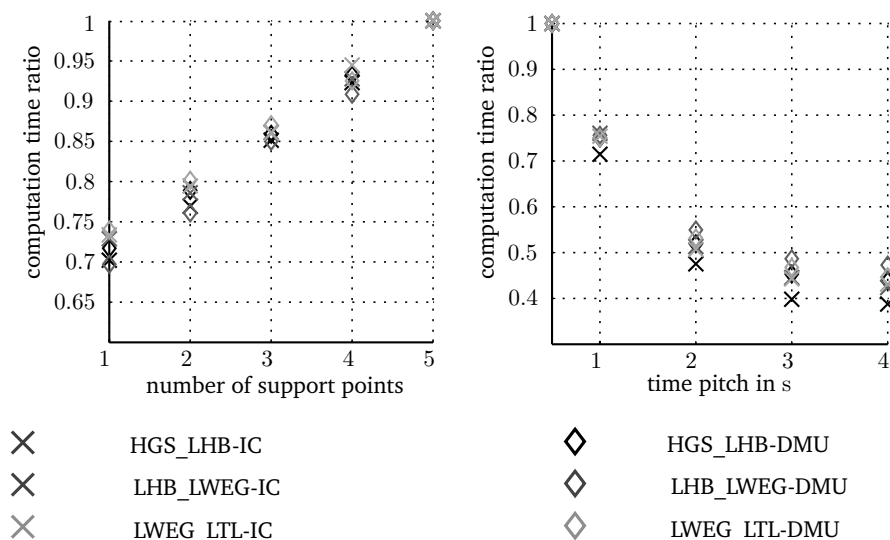


Figure 8: Ratio of computation times of GAUSS-quadrature over number of support points n and EULER's-method over time pitch dt (slope profile accuracy 250 – 1).

on the time which is needed to transit a track, so the discrete algorithm is additionally affected by the track length, the train's velocity and the time pitch used for discretisation. As the amount of changes in the tractive function is much lower than the one of the gradient function these will have a less impact on the computation times.

From Figure 8 one can see, that the length of a track has less influence on computation time than the choice of the method's parameter. The choice of the train parameters influences the computation time less, too.

The computation time of the GAUSS-quadrature behaves for GAUSS-grade n like $O(n)$. The one of EULER's-method first decreases in a logarithmic way for rising time pitch, but shows almost constant behaviour later. It also shows the big spreading of the computation time of EULER's-method over the time pitches. The difference between the computation time of the highest and the lowest pitch amounts almost to one to three.

The analytical algorithm is, as Figure 9 shows, in many cases among the fastest and GAUSS-quadrature is for small polynomial grades ten percent faster than the analytical algorithm. For $n = 1$ the computation time reached only 0.9 times of the one of the analytical algorithm. EULER's-method with pitches of at least 3 s is as fast as analytical solving. While GAUSS-quadrature of higher grades (up to 4) need up to 40% and EULER's-method with less pitches of 0.5 s use 80 % more computation time than the analytical algorithm.

The benefit of the other algorithms towards EULER's-method lowers with the rising amount of slope steps and increasing time pitch. In Figure 9 the development of computation times is represented by the vertical distribution of the markers of one algorithm while

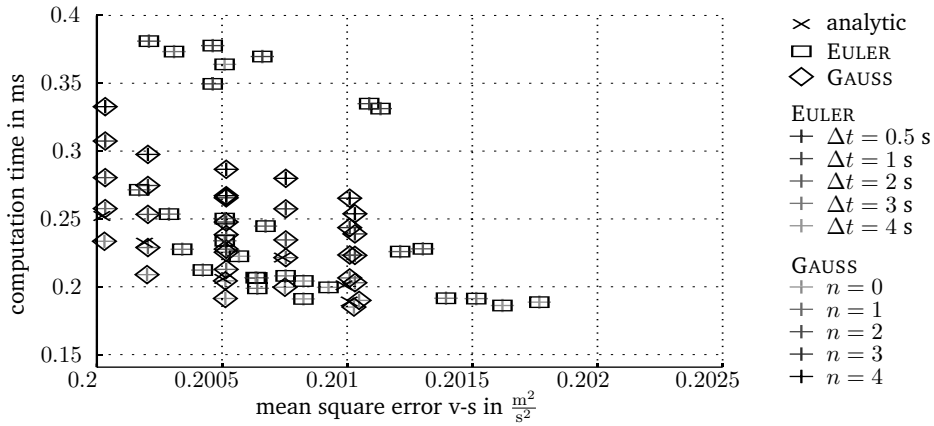


Figure 9: Computation times and errors of the algorithms (marked with cross, rectangle and diamond) and parameters; track HGS-LHB; IC; different slope profile accuracies.

the horizontal distribution of methods of the same type is caused by the use of different slope profile (which are not named in the figure due to readability reasons; please see chapters 4.3 and 4.3, instead). Thereby, a strong dependence of computation errors and times on the slope discretisation of all methods apart from EULER’s-method is shown. The result of [Weg05], whereby a numerical solution of the integral equation using GAUSS-quadrature uses only half of the computational power than the analytic algorithm could not be reproduced with the given implementations of both.

Influence of the used method on computation errors

The grade of exactness of EULER’s-method depends on

- the time pitch used for discretisation and
- the acceleration/braking behaviour of the train (the deviation of tractive effort function from constant),

while the grade of exactness of the GAUSS-method depends on

- the chosen polynomial grade and
- the acceleration/braking behaviour of the train (the deviation of propulsion force function from polynomial).

Taking another look on 9 regarding the deviations in the computed velocity the different algorithms cause, it can be seen that the mean square error differs only in about one percent between the best and the least exact mass point solutions. But even more important it makes clear, that the main cause of these deviations are not algorithmic but lie in the quality of data of the gradient profile.

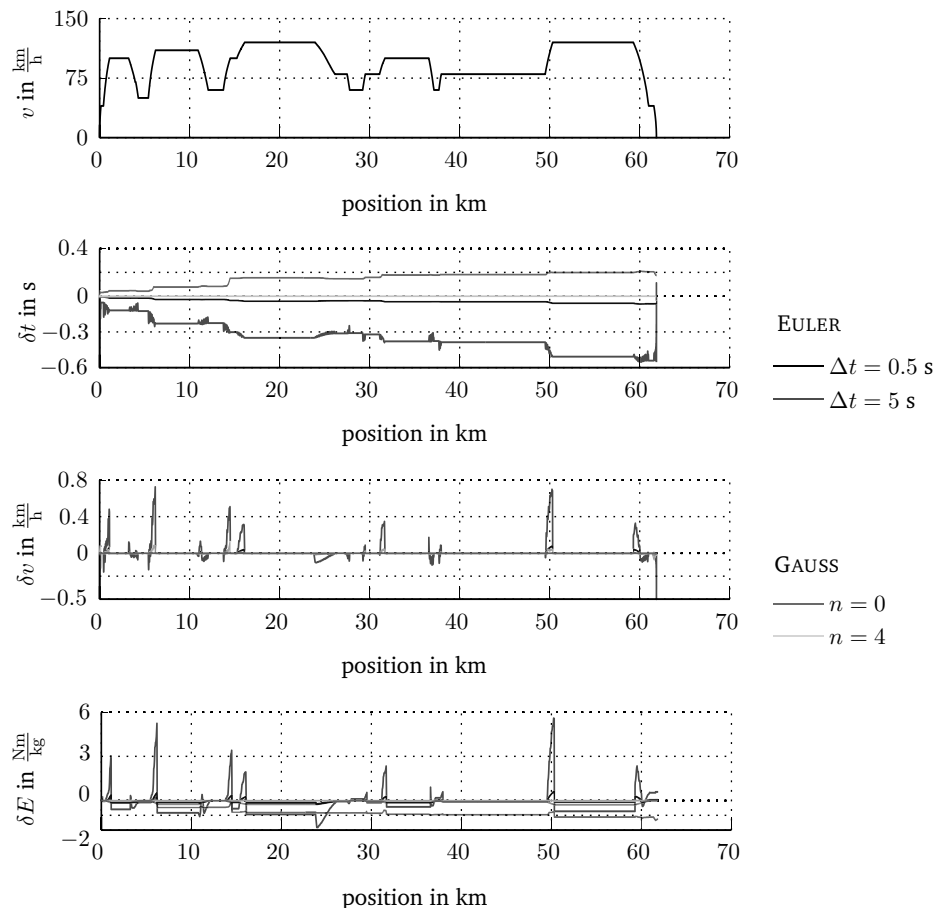


Figure 10: Differences of run over track HGS-LHB depending on time pitch dt or GAUSS-grade n .

As Figure 10 shows, time errors sum with increasing position, while errors in velocity do not, because of being tared at cruising phases at maximum velocity. Because acceleration is assumed stepwise constant for EULER's-method deviations are the bigger the steeper the function of propulsion force runs. The maximal acceleration is bigger for small velocities than for big ones which leads to an overestimation of velocities and an underestimation of running times during acceleration phases. In braking phases with forward computing the lower start velocity related braking force is assumed and, therefore, sections with high velocity will be crossed in longer times than necessary which means that braking time will be overestimated. These effects of overestimating braking times and underestimating acceleration times can partly cancel each other out.

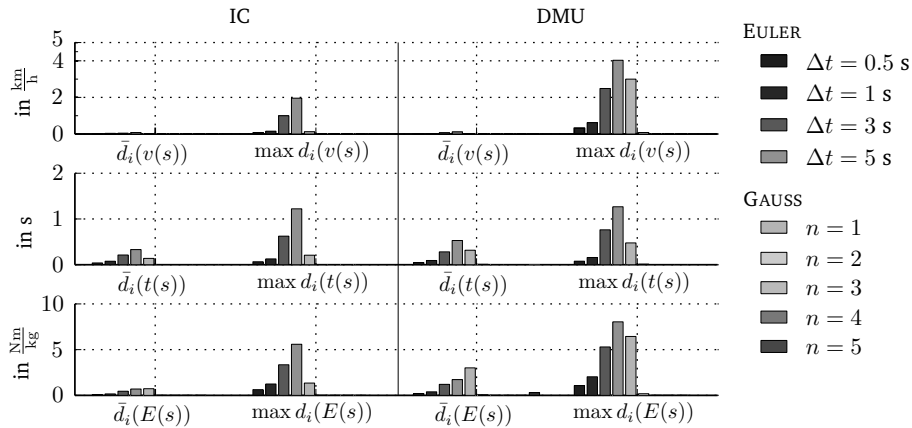


Figure 11: Mean and maximum differences of a run over track HGS-LHB depending on time pitch dt /GAUSS-grade n (no significant errors from $n \geq 1$).

The differences of numerical towards analytical solutions are in all cases very small and lay below two kilometre per hour average velocity deviation and under one second time deviation for the IC train on average. At energy consumption maximum differences of not more than two percent for the most simplistic time pitch of four seconds are to be observed. Average deviations are below one percent.

Figure 11 shows that the deviations for the DMU are of the same order although they are slightly higher due to a different behaviour of the traction force function. The deviation in velocity reaches values of about 2 km/h for IC and 4 km/h for DMU when using an EULER's-method time pitch of 5 s. Regarding time inaccuracies both values stay below 1.5 s. Choosing smaller time pitches lead to smaller deviations, e.g. below 1 km/h and 0.2 s for time pitches of 1 s. GAUSS-quadrature deviation stay smaller and are negligible for grades bigger than one.

Influence of the slope discretisation on computation times

As the effort caused by a single computation of the analytic algorithm and GAUSS-quadrature of greater grades is comparatively big, these methods profit most when the slope profile is simplified, because those simplifications directly lead (away from velocity restrictions) to a lower number of computations. Because of its design as step method EULER's-method benefits less. Nevertheless, the gain of computation time is for all methods remarkable.

Figure 12 shows that with the use of slope discretisation it is possible to reduce computation times of EULER's-method to the half and of the both other methods to one third.

Influence of the slope discretisation on computation errors

As noted before EULER's-method tends to underestimate running times. This effect seems to enlarge on this track with increasing slope pitches, but remains negligible even for the biggest

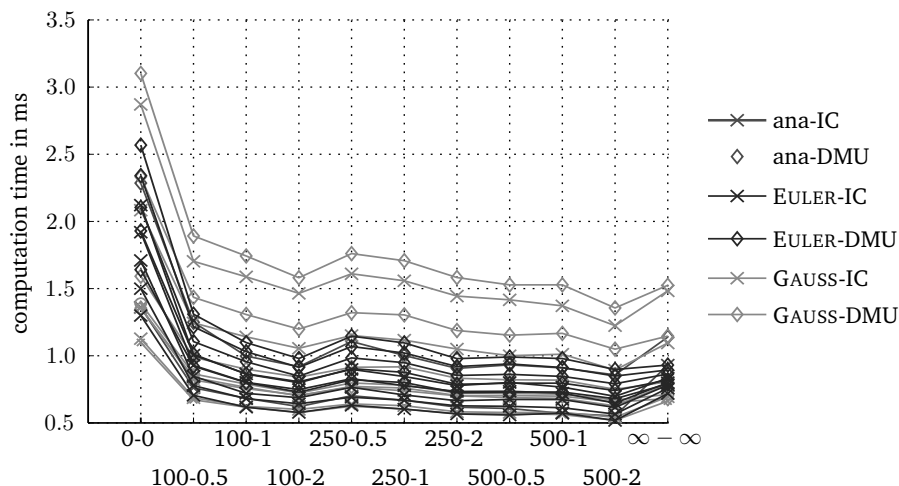


Figure 12: Computation times of runs with different parameter configurations in dependence of detailedness of slope profile of track HGS-LHB.

pitch with about one half second over the whole track. The deviations in velocity remain – except for the track with constant slope profile – with a mean of about two kilometre per hour negligible (refer to Table 7).

When computing the track the opposite travel direction slope simplification leads to an overestimation of the running time, which means that the observed rising underestimation will be replaced by an overestimation.

If one uses the mean slope only especially the coasting regime trajectory will be inexact. Moreover will the computation of energy consumption no longer be reliable. Hence, the slope profile should not be abdicated if the coasting regime is used and energy optimisation computations are performed.

Influence of mass modelling

Computation with mass strap and those with a pre-computed slope profile under high exactness offer the best results with deviations smaller than three seconds and a mean deviation of about one second for IC (see Figure 13). On computing with simplified slope profiles this advantage got lost. For the passenger trains pre-computation with simplification does not have advantages towards mass point computation, not in exactness and also not in computation times (see Figure 14). For the IC and the DMU the deviations of mass point computation from mass strap computation can be considered low. The differences are in mean below two seconds and one kilometre per hour, but the computation time of the mass point solutions is more than one hundred times shorter than the times needed for the most precise solution.

When simulating freight trains, which are much longer and can be much heavier than passenger trains the mass point model leads to bigger deviations up to 6 s and about 8 km/h

Table 7: Slope discretisation; mean and maximum deviations.

parameter	$\bar{d}_i(v(s))$	$\max d_i(v(s))$	$\bar{d}_i(t(s))$	$\max d_i(t(s))$
$\infty - \infty$	$4.06 \cdot 10^0$	$3.11 \cdot 10^1$	$2.90 \cdot 10^1$	$4.98 \cdot 10^1$
500 – 2	$2.11 \cdot 10^{-1}$	$2.03 \cdot 10^0$	$2.26 \cdot 10^{-1}$	$9.97 \cdot 10^{-1}$
500 – 1	$1.69 \cdot 10^{-1}$	$2.03 \cdot 10^0$	$1.11 \cdot 10^{-1}$	$7.87 \cdot 10^{-1}$
500 – 0.5	$1.60 \cdot 10^{-1}$	$1.92 \cdot 10^0$	$2.86 \cdot 10^{-1}$	$9.91 \cdot 10^{-1}$
250 – 2	$1.03 \cdot 10^{-1}$	$1.03 \cdot 10^0$	$1.88 \cdot 10^{-1}$	$3.38 \cdot 10^{-1}$
250 – 1	$7.53 \cdot 10^{-2}$	$1.03 \cdot 10^0$	$2.08 \cdot 10^{-1}$	$3.43 \cdot 10^{-1}$
250 – 0.5	$5.49 \cdot 10^{-2}$	$1.03 \cdot 10^0$	$2.17 \cdot 10^{-1}$	$2.77 \cdot 10^{-1}$
100 – 2	$9.33 \cdot 10^{-2}$	$1.06 \cdot 10^0$	$3.56 \cdot 10^{-1}$	$5.37 \cdot 10^{-1}$
100 – 1	$3.66 \cdot 10^{-2}$	$3.28 \cdot 10^{-1}$	$5.23 \cdot 10^{-2}$	$1.68 \cdot 10^{-1}$
100 – 0.5	$1.27 \cdot 10^{-2}$	$2.40 \cdot 10^{-1}$	$1.56 \cdot 10^{-2}$	$5.19 \cdot 10^{-2}$

on the tested track (see Figure 13). Using the pre-computed slope profile with a small degree of simplification provides reasonable computation times at acceptable errors. Those results like shown in Figure 13 can be achieved by conversing the processing order of the steps performed by the algorithm described in section 2.3. As the biggest gain of computation time is made using profiles with minor simplifications the use of these has to be preferred.

5 Conclusions and further work

In order to obtain a train running simulation model which can be applied for timetabling, real-time dispatching and driver advisory systems, three common methods were examined in detail and implemented on the same basis of a modern programming language. It turned out, that GAUSS-quadrature can only be used with orders higher than four because of the critical behaviour at coasting phases. For the other regimes the minimal grade two can be used, but overall no significant advantage in computation time towards analytical solving could be measured. EULER’s method has proven to be a good alternative using time pitches in the order of three seconds: Then the computation time is comparable to analytic solving while the errors are negligible (below one second on the longest tested track with a mean gradient profile accuracy). The reduction of deviations (i.e. an increase in accuracy) as obtained with the decrease of the time pitch to below three seconds is in an order of magnitude, which is practically not relevant, as the normal statistical variations in operation (due to weather and train mass variations) are a lot bigger than these wins in accuracy.

Opting for EULER’s method additionally enables easy extensibility of the algorithms, e.g. to integrate with electric network calculation [Ste10]. There, time pitches of one second are usually required not for running time accuracy reasons but for further processing. Computing power values at these small time pitches does increase the advantage of EULER’s method as the other examined methods gain their advantages out of the ability to compute running

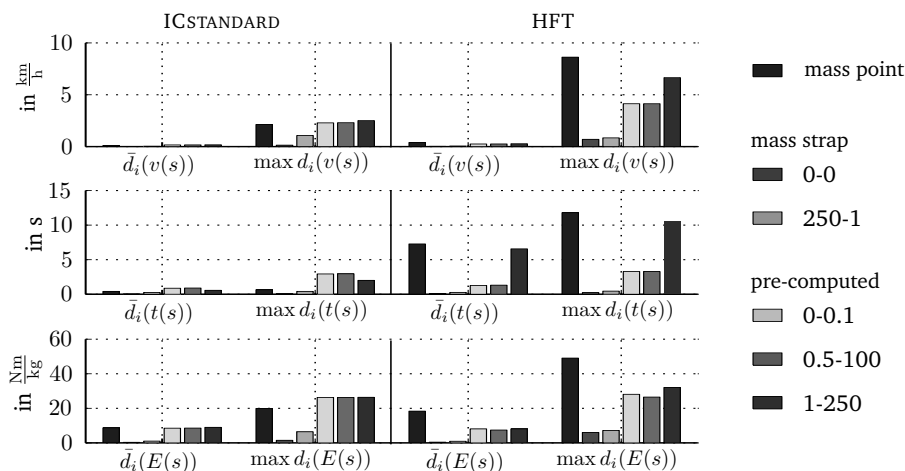


Figure 13: Different mass models, and discretisation variants; Mean and maximum deviations in time of run over track HGS-LHB for IC and HFT. Please note the conversed notation of discretisation parameters due to inverted processing order.

times with an acceptable accuracy by the use of fewer support points. With the compulsion of computing a point every second this advantages are lost.

It should be estimated whether a further gain of computation time by similar deviations are achievable by adaptive step methods like the DORMAND-PRINCE method. This method belongs like EULER’S method to the family of RUNGE-KUTTA-methods and works very similar but uses multiple function evaluations for adapting the step size or to gain a better approximation of the desired integral value. Therefore, the step size compared to the one used by EULER’S method had to be enlarged at least by the factor resulting from the number of function evaluations used to gain a value. Regarding the promising result of EULER’S method this is not very likely, but worth investigating.

From Figure 14 it can be seen, that errors vary little and that mass point computations are considerably faster than mass strap computations. Mass strap computations show mean square errors between 0 and $0.04 \frac{m^2}{s^2}$ while mass point computations have errors of 0.02 to $0.06 \frac{m^2}{s^2}$. In this overlapping area between 0.02 and $0.04 \frac{m^2}{s^2}$ mass point computations are remarkably faster by using only one fifth of the computation time. The more accurateness is gained by the use of mass strap models, the more time consuming is the calculation up to more than one hundred times of the calculation time needed for fast mass point calculations. The exception in these considerations form the computations using the non-simplified (0-0) gradient profiles where the mass point models loose their advantages in computation time because of the need to compute too many points.

Because errors remain small for the examined passenger train types it is recommendable to choose the mass point model. For longer freight trains mass point calculation on pre-computed slope profiles is only advisable when merely small simplifications are made or if

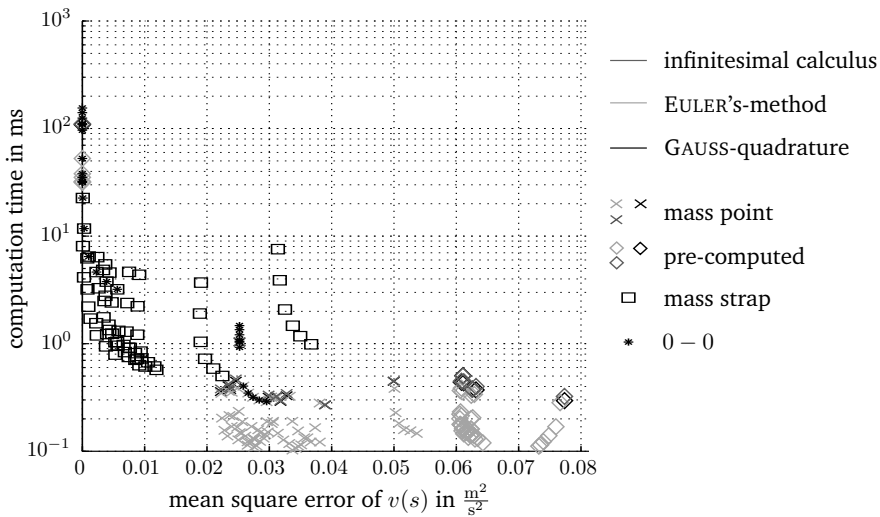


Figure 14: Computation times and computation errors of the methods (indicated in different colours) and mass models (indicated with markers); IC.

the simplification process can be improved further, so that it adapts to the needs of this type of simulation. The observed effects show a stable behaviour independent of the choice of trains or tracks.

Acknowledgement

This work is part of the EU project ON-TIME (Optimal Networks for Train Integration Management in Europe) under the grant agreement FP7-SCP01-GA-2011-285243 which is co-funded by the European Commission within the Seventh Framework Programme (2007-2013).

References

- [Alb05] T. ALBRECHT: “Energy-efficient train control in suburban railways: experiences gained from onboard tests of a driver assistance system”. In: *1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, RailDelft2005*. June 8–10, 2005.
- [Alb09] T. ALBRECHT: “The Influence of Anticipating Train Driving on the Dispatching Process in Railway Conflict Situations”. In: *Netw. and Spat. Econ.* 9.1 (2009), pages 85–101.

- [Alb12] T. ALBRECHT and M. PATHE: “Pilotierung eines Assistenzsystems zur kraftstoffsparenden Fahrweise im SPNV”. In: *EI - Eisenbahningenieur* 63.9 (Sept. 2012), pages 66–70.
- [Bie01] F. BIERBAUM: *Lehr- und Übungsbuch Numerische Mathematik*. Edited by W. PREUSS and G. WENISCH. Fachbuchverlag Leipzig, 2001. ISBN: 3-446-21375-9.
- [Brü11] O. BRÜNGER and E. DAHLHAUS: “Running Time Estimation”. In: *Railway Timetable & Traffic*. Edited by I. HANSEN and J. PACHL. eurailpress, 2011, pages 58–82.
- [Cor11] F. CORMAN, A. D’ARIANO, M. PRANZO, and I. A. HANSEN: “Effectiveness of dynamic reordering and rerouting of trains in a complicated and densely occupied station area”. In: *Transp. Plan. and Technol.* 34.4 (2011), pages 341–362. DOI: 10.1080/03081060.2011.577152.
- [DAr07] A. D’ARIANO, M. PRANZO, and I. A. HANSEN: “Conflict Resolution and Train Speed Coordination for Solving Real-Time Timetable Perturbations”. In: *IEEE Trans. on Intell. Transp. Syst.* 8.2 (2007), pages 208–222. DOI: 10.1109/TITS.2006.888605.
- [Got10] R. G. GOTTLIEB and B. F. THOMPSON: “Bisected Direct Quadratic Regula Falsi”. In: *Applied Mathematical Sciences*, 4.15 (2010), pages 709–718.
- [How95] P. G. HOWLETT and P. J. PUDNEY: *Energy-Efficient Train Control*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1995.
- [Kra81] K. H. KRAFT and E. SCHNIEDER: “Optimale Trajektorien im spurgebundenen Schnellverkehr”. In: *Regelungstechnik* 29.4 (1981), pages 111–119.
- [Lüt09] M. LÜTHI: “Improving the Efficiency of Heavily Used Railway Networks through Integrated Real-Time Rescheduling”. PhD thesis. ETH Zürich, 2009.
- [Mer99] G. MERZIGER, G. MÜHLBACH, D. WILLE, and T. WIRTH: *Formeln+Hilfen zur höheren Mathematik*. Hannover: Binomi Verlag, 1999.
- [ONT13] *ON-TIME Project Website*. 2013. (Visited on 11/01/2013).
- [Pac08] J. PACHL: “Running Time Estimation”. In: *Railway Timetable & Traffic*. Edited by I. A. HANSEN and J. PACHL. Eurailpress, 2008. Chapter Timetable Design Principles, pages 9–42.
- [Ric12] *Einführung in die Numerische Mathematik*. Lecture note. T. RICHTER and T. WICK University of Heidelberg. July 2012.
- [rML13] *railML 2.1 documentation*. 2013. URL: <http://www.railml.org/index.php/dokumentation.html> (visited on 11/01/2013).

- [Roc00] B. P. ROCHARD and F. SCHMID: “A review of methods to measure and calculate train resistances”. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 214.4 (2000), pages 185–199. DOI: 10.1243/0954409001531306.
- [Rod07] J. RODRIGUEZ: “A constraint programming model for real-time train scheduling at junctions”. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 41.2 (2007), pages 231–245. DOI: 10.1016/j.trb.2006.02.006.
- [Sch11] T. SCHANK: “A Fast Algorithm for Computing the Running-Time of Trains by Infinitesimal Calculus”. In: *The 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, RailRome 2011*. Feb. 16–18, 2011.
- [Ste10] A. STEPHAN: “OpenPowerNet - The New Co-Simulation Tool for Traction Power Supply”. In: *IET Conference on Railway Traction Systems*. Birmingham, Apr. 13–15, 2010.
- [Tho11] F. THONIG, T. ALBRECHT, and J. KRIMMLING: “Nutzung einer Sensorkombination aus GPS und Barometer zur Bestimmung des Neigungsprofils von Bahnstrecken”. In: *DGON-Symposium Positionierung und Navigation für Intelligente Verkehrssysteme, POSNAV ITS 2011*. Nov. 22–23, 2011.
- [Tör06] J. TÖRNQUIST: “Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms”. In: *5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways*. Edited by L. G. KROON and R. H. MÖHRING. Dagstuhl: Internationales Begegnungs- und Forschungszentrum für Informatik (IBFI), 2006. ISBN: 978-3-939897-00-2. URL: <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2006/659>.
- [Tör90] W. TÖRNIG: *Numerische Mathematik für Ingenieure und Physiker*. 2nd. Berlin; Heidelberg: Springer, 1990. ISBN: 3-540-51891-6.
- [Weg05] S. WEGELE: *Echtzeitoptimierung für die Disposition im Schienenverkehr*. Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik. VDI-Verlag, 2005. ISBN: 978-3-183-60112-7.
- [Wen03] D. WENDE: *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*. Teubner Verlag, 2003.
- [Wen91] H. WENZEL: *Gewöhnliche Differentialgleichungen*. Volume 1. Leipzig: Teubner, 1991. ISBN: 3-322-00800-2.

Corresponding author: Birgit Jaekel, Technische Universität Dresden, Faculty of Transport and Traffic Sciences “Friedrich List”, Chair of Traffic Control and Process Automatisations, phone: +49 351 463-36786, e-mail: birgit.jaekel@tu-dresden.de

Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung

Leiter der Professur

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling

Telefon: +49 351 463-39750

E-Mail: Juergen.Krimmling@tu-dresden.de

Sekretariat:

Martina Zahr

Telefon: +49 351 463-36784

Telefax: +49 351 463-36785

E-Mail: Martina.Zahr@tu-dresden.de

Hausanschrift:

Hettnerstr. 3

01069 Dresden

Gerhart-Potthoff-Bau, Haus 2, Raum 57

Postanschrift:

TU Dresden

Fakultät für Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

Institut für Verkehrstelematik

01062 Dresden

In den nachfolgenden Tabellen sind in der Spalte „Telefon“ nur die Apparatnummern der Mitarbeiter aufgeführt. Die Einwahl in das Netz der TU Dresden lautet +49 351 463 - und ist der Apparatnummer voranzustellen.

Wissenschaftliche Mitarbeiter (Stand: September 2015)

Name	Telefon	E-Mail
Dipl.-Ing. Ralf Engelmann	36768	Ralf.Engelmann@tu-dresden.de
Dr.-Ing. Ralf Franke	36754	Ralf.Franke@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Dipl.-Swt. Sven Fröhlich	36718	Sven.Froehlich@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Christian Gassel	36749	Christian.Gassel@tu-dresden.de
Birgit Jaekel	36786	Birgit.Jaekel@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Matthias Körner	36768	Matthias.Koerner@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Mario Krumnow	36780	Mario.Krumnow@tu-dresden.de
Dr.-Ing. Martin Lehnert	42536	Martin.Lehnert@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Anja Liebscher	36751	Anja.Liebscher@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Tobias Matschek	36723	Tobias.Matschek@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Sebastian Pape	36812	Sebastian.Pape@tu-dresden.de
Dipl.-Medieninf. Jens Petermann	36779	Jens.Petermann@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Gunter Thiele	36766	Gunter.Thiele@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Astrid Schindelhauer	36765	Astrid.Schindelhauer@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Susanne Wunsch	36689	Susanne.Wunsch@tu-dresden.de
Promotionsstudentin:		
Dipl.-Ing. Anne Binder	36764	Anne.Binder@tu-dresden.de
weitere, zwischenzeitlich ausgeschiedene wissenschaftliche Mitarbeiter:		
Dipl.-Ing. Andreas Kretschmer		(bis Juni 2015)
Dr.-Ing. Thomas Albrecht		(bis April 2014)
Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Peter Döge		(bis Februar 2014)
Dipl.-Ing. Renatus Matuschowitz		(bis Februar 2014)
Dipl.-Ing. Frank Thonig		(bis Januar 2014)

Technische Mitarbeiter (Stand: September 2015)

Name	Telefon	E-Mail
Lutz Buschmann	36747	Lutz.Buschmann@tu-dresden.de
Henning Jeske	36778	Henning.Jeske@tu-dresden.de