VDI VDE Mess- und Automatisierungstechnik

AUTOREG 2017



VDI-Berichte 2292

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

VDI-BERICHTE
Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

VDI VDE Mess- und Automatisierungstechnik

Autoreg 2017

Automatisiertes Fahren und vernetzte Mobilität

8. VDI/VDE-Fachtagung,
Berlin, 5. und 6. Juli 2017



VDI-Berichte 2292

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter http://dnb.ddb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
(German National Library)
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie
(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at http://dnb.ddb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2015

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuskriptdruck. Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder.

Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092233-1

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Inhalt

		Seite
	Vorwort	1
Plenarvorträge		
E. D. Dickmanns	Entwicklung des Gesichtssinns für automatisiertes Fahren – Der 4-D Ansatz brachte 1987 den Durchbruch	5
A. Grunwald	Ethik und Risiko. Zur Akzeptanz selbstfahrender Autos	21
Posterbeiträge		
T. Daszenies, T. Könings, S. X. Ding, F. Wobbe, J. Klöck, N. Weinhold	Kennfeldbasierte Leerlaufregelung einer Verbrennungskraftmaschine	33
M. Haßenberg, G. Wittler, H. Briese, T. Schubert, H. Henrichfreise	Systematische modellbasierte Schwingungsanalyse einer geregelten elektrischen Servolenkung	45
S. Henning, P. Biemelt, K. Abdelgawad, S. Gausemeier, A. Trächtler	Modellbasierte Untersuchung der Zuverlässigkeit algorithmisch bestimmter kritischer Stellen in Straßennetzwerken	57
T. Gothan, R. Großmann, B. Bäker	Entwicklung eines Frameworks für neue Fahrerassistenzfunktionen in der Cloud	69

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Seite

Umfelderkennung und Datenfusion

C.-E. Framing, T. Quack, F.-J. Heßeler, D. Abel	Lokalisierung und Bewegungsprädiktion für vernetzte Fahrzeuge an städtischen Kreuzungen	79
M. Harr, C. Schäfer,	Robust Odometry Estimation for Automated Driving and Map Data Collection	91

Fahrstrategien

A. Noll, C. Ament	Potenzialanalyse prädiktiver Streckendaten zur Komfortsteigerung von Fahrzeugen mit geregelten Vertikaldynamiksystemen	103
M. Eisenbarth, T. Plum, J. Andert	Einfluss von Verkehrsteilnehmern auf die Online-Optimierung der Fahrtstrategie	115
C. Winter, R. de Castro,	Optimal Velocity Profile Generation for Semi-Autonomous Vehicles	129
R. Großmann, T. Gothan, B. Bäker	Adaption des Fahrerverhaltens in Abhängigkeit der Fahrsituation durch intelligente Fahrstrategien	143

Batterie- und Energiemanagement

S. Gantenbein, M. Weiss, E. Ivers-Tiffée	Elektrochemische Charakterisierung und physikalische Modellierung von Lithium-Ionen Batterien	157
M. Joševski, D. Abel	Potenziale stochastischer modellgestützter prädiktiver Regelungsverfahren für das Energiemanagement von Hybridfahrzeugen auf Realfahrzyklen	171

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Seite

J. Li, T. Huber, C. Beidl	Multikriterielle Betriebsstrategie für Hybrid Antriebsstränge	185
M. Eckert, S. Hohmann	Fraktionale Zeitbereichsidentifikation einer Lithium-Ionen-Zelle mit realen Messdaten	213

Trajektorienplanung für automatisiertes Fahren

I. Gundlach, U. Konigorski, J. Hoedt	Zeitoptimale Trajektorienplanung für automatisiertes Fahren im fahrdynamischen Grenzbereich – Eine modellbasierte Rundenzeitoptimierung für seriennahe Fahrzeuge	223
T. Hansen, M. Schulz, M. Knoop, U. Konigorski	Kombinierte Längs- und Quertrajektorienplanung für automatisierte Fahrstreifenwechsel	235
C. Götte, C. Wissing, M. Keller, T. Nattermann, C. Haß, K.-H. Glander, T. Bertram	Simulationsbasierte Entwicklung eines Trajektorienplanungsverfahrens für automatisiertes Fahren	247

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Antriebsstrangregelung

L. Kiltz, T. Mindel, A. Jungaberle	Modellbasierte Regelung des Anfahrvorgangs mit einem hybriden Antriebsstrang für Kraftfahrzeuge	261
A. Tarasow, J. V. G. Tilly T. Arndt, B. Neudecker, R. Serway	Adaptive Ermittlung des viskosen Reibmoments bei hydraulisch betätigten Nasskupplungen	273
A. Zech, T. Eberl, S. Müller	Analyse einer neuen kaskadierten Reglerstruktur für die Antriebsschlupfbegrenzung hochdynamischer Fahrzeugantriebe – Ansatz zur Dämpfung von Torsionsschwingungen im Antriebsstrang	287

Trajektorienplanung für automatisiertes Fahren

Q. Wang, S. Müller	A path planning controller for unsignalized intersection based on model predictive control and potential field method	299
M. Hisung, D. Martinovic, M. Grimm, H.-C. Reuss	Assistenzsystem für automatisierte Fahrzeug-positionierung bei induktiven Ladesystemen	309
T. Raste, A. Tarraf	Flachheitsbasierte Trajektoriengenerierung und Folgeregelung mit modellprädiktiver und modellfreier Regelung	319

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Regelung von Verbrennungsmotoren

M. Keller, D. Abel, T. Albin, B. Jochim, B. Jochim, H. Pitsch	Modellbildung und Regelung eines Freikolbenlinear-generators	325
M. Grotjahn, B. Luck, M. Feldt	Nichtlineare adaptive Regelung und Störkraft-kompensation für elektrische Gaspfadaktoren	337
D. Ritter, D. Abel, T. Albin, M. Korkmaz, H. Pitsch	Modellbasierte Regelung von Erdgas-Diesel Dual-Fuel Motoren	353

Automatisiertes Fahren

B. C. Heinrich, D. Fassbender, H.-J. Wuensche	Autonomous Cooperative Multi-Convoy Control for Off-Road-Scenarios	365
J. Gallep, S. Müller	Modellprädiktive Regelung zur Querführung automatisierter Fahrzeuge	377

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Seite

Fahrsimulation

A. Ebel, *M. Orner,* *T. Riemer,* *H.-C. Reuss*	Optimierte Auslegung von Antriebssträngen mittels der FKFS-Triebstrangbibliothek – Vorstellung der FKFS Triebstrangbibliothek und der Kopplung mit dem MO-CMA-ES an der Auslegung eines Elektrofahrzeuges	391
S. Wolter, *S. Kerkmann*	Gaming trifft Automotive – Umweltsimulation zur Absicherung von Fahrerassistenzfunktionen	403
D. Frerichs, *M. Borsdorf,* *K. M.Hahn*	FMI in der Simulation von Fahrdynamikregelsystemen	415

Absicherung automatisierter Fahrfunktion

T. Ullrich, *M. Baechle*	Einfluss automatisierter Fahrfunktionen auf Auslegung und System Design von Bremssystemen	425
F. Reinbold, *U: Becker*	Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung nach ISO 26262 am Beispiel eines induktiven Valet Charging Systems	437
A. Kilic, *T. Shen,* *K. Gorelik*	Entwicklung eines fail-operational Bordnetzes für autonomes Fahren	449

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Agile Softwareentwicklung

J. Richenhagen, M. Schumacher, J. Pinnekamp, V. Kumar Konenki	Developing Adaptive Lighting in an Agile Software Factory	461
M. Behle, A.-M. Meyer	New methods for control algorithm design	475
T. Sehnke, D. Schwarzmann, R. Baur, M. Schultalbers, R. Ernst	Zeitliche Eigenschaften in komponentenbasierter Automotive-Software	479

Entwicklungsmethode und virtuelle Validierung

M. Kehrer, M. Hisung, H.-C. Reuss	Machbarkeitsstudie zum virtuellen Trainieren und Testen von künstlichen neuronalen Netzen	491
M. Bauer, R. Mannale, M. Kochem, A. Ravi	CaliSim – Calibration by Simulation – Virtuelle Applikation elektromechanischer Lenkungen	501
U. Bauer, M. Becker, U. Sieber	Embedded Control Functions für ein aktives Fahrpedal mit hoher Güte effizient entwickelt	515

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Seite

Fahrsimulatoren

Z. Gong, *U. Konigorski*	Entwicklung eines Regelungskonzeptes für einen selbstfahrenden Fahrsimulator	529
K. Abdelgawad, *S. Henning,* *P. Biemelt,* *S. Gausemeier,* *A. Trächter*	Networked Driving Simulation for Future Autonomous and Cooperative Vehicle Systems – Development of a Modular Platform for Networked Driving Simulation Based on High-Level Architecture	539
P. Bolia, *S. Müller*	Numerical Modelling of the Human Driver for lateral closed-loop steering maneuvers	551

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Vorwort

Die **8. VDI/VDE-Fachtagung ‚AUTOREG 2017'** zeigt in über 40 ausgewählten Fachbeiträgen den Stand der Technik und ihre Anwendungen, Perspektiven für weitere Entwicklungen von neuen Ideen bis zur Serienapplikation auf. Es findet ein allgemeiner Erfahrungsaustausch zwischen Experten aus der Industrie und der Wissenschaft statt.

Die individuelle Mobilität und das Kraftfahrzeug werden sich nach allen Prognosen in den nächsten 10 bis 15 Jahren stärker verändern als in den vergangenen Jahrzehnten. Treiber dieser Entwicklung sind das automatisierte und elektrische Fahren sowie die Vernetzung der Fahrzeuge untereinander und ihre Integration in eine intelligente Infrastruktur (Vehicle2X).

Die Steuer- und Regelungstechnik sowie die Informationstechnik gelten als wichtige Schlüsseltechnologien auf dem Weg zur automatisierten vernetzten Mobilität.

Zu folgenden Schwerpunktthemen berichten die Vorträge:

- Steuer- und Regelungstechnik, Informationstechnik
- Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren
- Brems-, Lenk- und Antriebssysteme
- Fahrzeugsystemarchitekturen und Vernetzung
- Entwicklungsmethodik

Die Fachtagung 'AUTOREG 2017' findet parallel zur Internationalen Fachmesse ConCarExpo – International Expo & Congress for Connected Car and Mobility statt.

Die Tagungsleiter

Prof. Dr.-Ing. Ferdinand Svaricek
Universität der Bundeswehr München
Neubiberg

Dr.-Ing. Wolf-Dieter Gruhle
ZF Friedrichshafen AG
Friedrichshafen

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Programmausschuss

Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel, *RWTH Aachen*

Dr.-Ing. Benedikt Alt, *Robert Bosch GmbH, Renningen*

Dr.-Ing. Uwe Becker, *TU Braunschweig*

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Torsten Bertram, *TU Dortmund*

Dr.-Ing. Ottmar Gehring, *Daimler AG, Stuttgart*

Prof. Dr.-Ing. Martin Grotjahn, *Hochschule Hannover*

Dr.-Ing. Wolf-Dieter Gruhle, *ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen (Tagungsleiter)*

Dr.-Ing. Carsten Haß, *ZF TRW Automotive, Düsseldorf*

Dr.-Ing. Michael Henn, *Volkswagen AG, Wolfsburg*

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Rolf Isermann, *TU Darmstadt*

Dr.-Ing. Michael Kochem, *Adam Opel AG, Rüsselsheim*

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski, *TU Darmstadt*

Prof. Dr.-Ing. Markus Lemmen, *Hochschule Bochum, Heiligenhaus*

Dr.-Ing. Thomas Raste, *Continental Teves AG & Co. OHG, Frankfurt*

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss, *Universität Stuttgart*

Dr.-Ing. Joachim Rückert, *BMW Group, München*

Dr.-Ing. Axel Schlosser, *FEV GmbH, Aachen*

Prof. Dr.-Ing. Ferdinand Svaricek, *Universität der Bundeswehr München, Neubiberg (Vorsitz und Tagungsleiter)*

Dr.-Ing. Dieter Schwarzmann, *IAV GmbH, Gifhorn*

Dr.-Ing. Udo Sieber, *Robert Bosch GmbH, Stuttgart*

Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler, *Universität Paderborn*

Dipl.-Ing. Reiner Weingärtner, *Continental Automotive GmbH, Regensburg*

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Fachliche Träger:

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA)

VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (FVT)

Ideelle Mitträger:

der Bundeswehr Universität München

Universität der Bundeswehr München

ZF Friedrichshafen AG

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Entwicklung des Gesichtssinns für automatisiertes Fahren

Der 4-D Ansatz brachte 1987 den Durchbruch

Dr.-Ing. **Ernst D. Dickmanns**, Prof. i.R., UniBw München, Neubiberg

Kurzfassung

Nach kurzen Skizzen der zeitlichen Entwicklung von Bodenfahrzeugen und digitalen Prozessrechnern wird der Durchbruch zu dynamisch sehenden Fahrzeugen in den beiden letzten Jahrzehnten des vorigen Jahrhunderts etwas eingehender behandelt. Das Projekt „ProArt“ im Rahmen des EUREKA-Vorhabens ‚PROMETHEUS‘ (ab 1987) brachte Europa an die Spitze der Entwicklung sehender Straßenfahrzeuge; der demonstrierte Stand an der UniBw München am Projektende 1994 wird beschrieben. Danach erfolgte eine zweimalige Aufspaltung der Entwicklungslinien, die thematisiert werden. Den Abschluss bildet ein Ausblick mit der Frage, ob langfristig sehende technische Subjekte auch aktive Augen haben werden wie die meisten hochentwickelten biologischen Systeme.

Abstract

Following short sketches of the temporal development of ground vehicles and digital microprocessors, the breakthrough to vehicles capable of dynamic vision in the last two decades of the previous century is treated to some more detail. The project “ProArt” in the framework of the EUREKA-initiative ‘PROMETHEUS‘ (starting 1987) has brought Europe in a leading position in the development of ground vehicles capable of real-time vision; the demonstrated state of development at UniBw Munich at the end of the project in 1994 is described. After that, two bifurcations in the line of development occurred that are discussed. An outlook with the question ‘Will technical agents with the sense of vision have active eyes like most highly developed biological species’ forms the conclusion.

1. Technischer Hintergrund bei Fahrzeugen, Elektronik und Methodik

Zur Einleitung sei ein kurzer Überblick über die zeitliche Entwicklung von Bodenfahrzeugen und Elektronik (Sensoren und digitalen Mikroprozessoren) mit einigem Abstand gestattet, der den abschließenden Ausblick motiviert. Bei der Methodik kamen die unterschiedlichen Hintergründe in der Informatik und dem Gebiet der Systemdynamik zum Tragen, die kurz beleuchtet werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1.1 Bodenfahrzeuge

Bild1 gibt einen gerafften Überblick über die Entwicklung von Radfahrzeugen in den letzten etwa sechs Jahrtausenden. Von einer in Polen gefundenen Keramik kann man schließen, dass schon vor fünfeinhalb tausend Jahren Radfahrzeuge bekannt waren (oben links in Bild 1). Älteste gefundene Reste von Rädern reichen gut fünftausend Jahre zurück (mit Speichen unten links, gut dreitausend [1]). Die alten Römer hatten schon ein weit ausgebautes Netz von Straßen über ganz Westeuropa. Lebewesen mussten über viele Jahrtausende die Antriebsleistung liefern. Im 18. Jahrhundert kamen die ersten Dampfmaschinen zur Erprobung, aber der Durchbruch zur Motorisierung von Straßenfahrzeugen erfolgte erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts, in Deutschland vor allem durch Carl Benz (rechter Bildteil). Die Serienfertigung von Autos am Fließband ab 1932 durch Henry Ford brachte zwar einen starken Anstieg der verkauften Automobile weltweit, aber der massive Anstieg der Bodenfahrzeuge in Deutschland erfolgte erst nach dem 2. Weltkrieg (Bild 2, gestrichelte Kurven, untere nur PKW). Die stückweise durchgezogene Kurve zeigt den Anstieg der Zahl der Unfalltoten in Deutschland, die im Jahr 1970 einen Höchststand erreichte; danach sank sie durch die verschiedensten Maßnahmen kontinuierlich ab. Seit mehreren Jahren liegt sie im wiedervereinigten Deutschland zwischen drei und vier tausend. Weltweit beträgt die Zahl



Bild 1: Skizze der zeitlichen Entwicklung von Radfahrzeugen bis ~ 1900

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

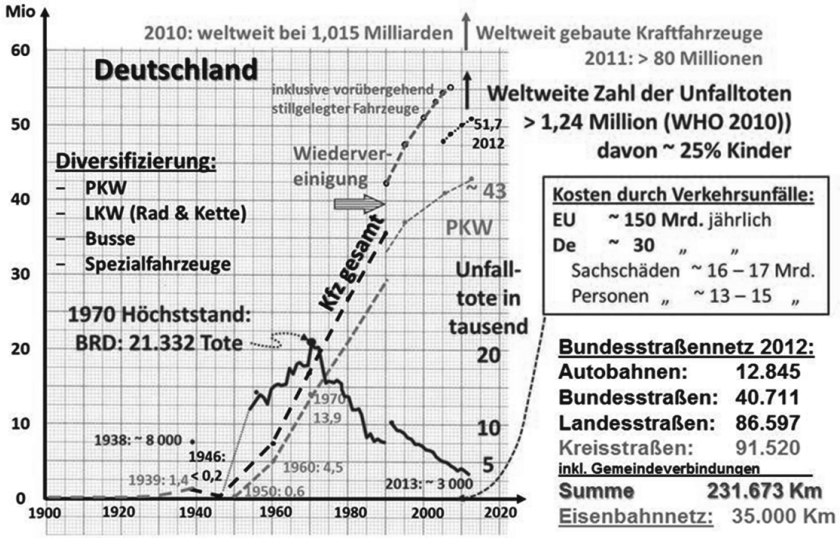


Bild 2: Kraftfahrzeuge als Massenprodukt und jährliche Zahl der Unfalltoten.

der jährlichen Verkehrstoten heute etwa 1¼ Millionen, davon etwa ein Viertel Kinder. Da menschliches Versagen die häufigste Ursache ist, liegt heute auf dem Gebiet der Unterstützung von menschlichen Fähigkeiten der größte Aufwand zum Fortschritt in Richtung null Verkehrstote. Deswegen sollen seine Sinnesfähigkeiten durch Elektronik ergänzt und erweitert, langfristig möglicherweise ersetzt werden. In [2] wird ein Überblick über die Geschichte sehender Straßenfahrzeuge gegeben.

1.2 Elektronik

Nach der Erfindung des Transistors 1947 und des Mikroprozessors (µP) in den 1970ern ist bisher eine ständige Weiterentwicklung der µP zu beobachten (Erhöhung der Taktraten, Verkleinerung der Breiten der Leiterbahnen, dichtere Packung etc.), die zu einer Steigerung der Rechenleistung um einen Faktor zehn alle vier bis fünf Jahre geführt hat. Bild 3 zeigt im Zentrum die Zahl der Transistoren für geläufige µP über der Zeit. Sie liegt 2017 bei etwa zehn Milliarden; Mitte der 80er Jahre lag sie bei ~ 1 Million. Das menschliche Gehirn hat etwa 100 Milliarden Neuronen (Bildmitte oben) mit je bis zu zehntausend Querverbindungen; die Zahl der Elemente, die in ihren Eigenschaften allerdings sehr unterschiedlich sind, wird von den technischen µP etwa in der ersten Hälfte der 20er Jahre erreicht werden, wenn die

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

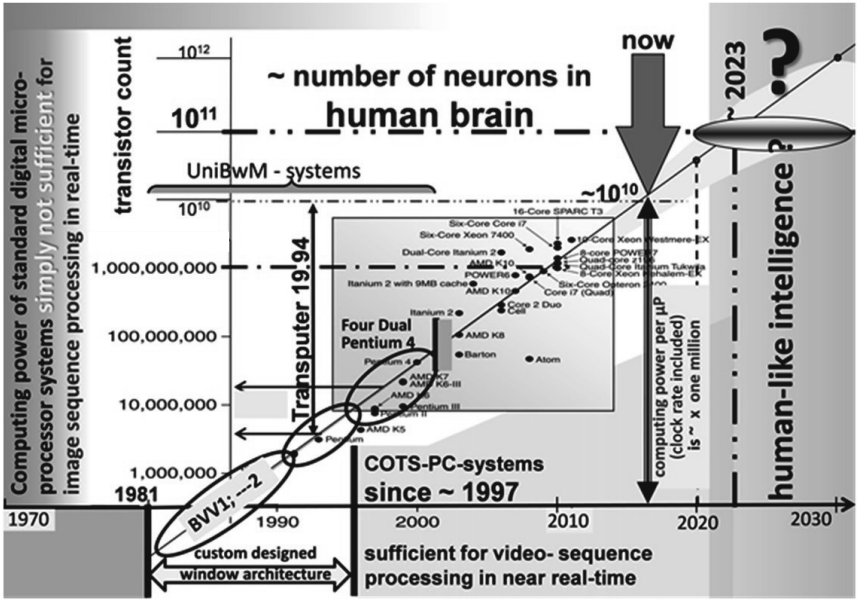


Bild 3: Skizze der Transistorzahlen pro µP mit gängigen Typen über der Zeit. Die gemittelte Steigung ergibt mit der parallelen Größenreduzierung den Leistungszuwachs von etwa einer Größenordnung alle vier bis fünf Jahre.

gemittelte Steigung im Bild (schwarze Diagonale) weiter gilt. Kann man dann mit menschenähnlicher Intelligenz bei technischen Systemen rechnen (rechts im Bild)? Der unten rechts schattierte Bereich gibt den Zeitraum an (seit ~ 1997), seit dem mit handelsüblichen Netzwerken und µP hinreichend leistungsfähige Echtzeit-Bildverarbeitungssysteme realisiert werden konnten. In der Lücke von ~ 1980 bis 97 mussten spezielle Konzepte eingesetzt werden, um das Ziel für spezifische Aufgabengebiete zu erreichen. Die US-amerikanische DARPA hatte 1982 eine große Entwicklung mit ‚Massiv Parallelen (Einfach-) Prozessoren' (MPP) angestoßen, die aber kaum zu einsetzbaren Ergebnissen geführt hat [3]. Man wollte in typischen Straßenumgebungen aller Art zunächst im Schritttempo fahren können.

Im Gegensatz dazu haben wir die Autobahnumgebung mit ihren strikt geregelten Fahrbahnparametern als Einstieg gewählt: Kreuzungsfreiheit, gute Oberflächen und Spur-Markierungen, unidirektionaler Verkehr etc. sowie begrenzte Arten von Verkehrsteilnehmern (nur schnelle Fahrzeuge, keine Radfahrer und Fußgänger etc.). Damit konnte die Zahl der verschiedenen notwendigen Extraktoren für Bildmerkmale klein gehalten werden. Bei Ver-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

wendung von rekursiven Schätzverfahren aus der Systemdynamik und einem speziellen ‚Fensterkonzept' (s. unten) bei Parallelprozessoren, sollte Echtzeitbetrieb mit etwa 10 Hz Auswertefrequenz und konventionellen µP bei dieser Aufgabe schon Anfang der 1980er Jahre möglich sein.

1.3 Methodik

Wesentlich für die Systemleistung bei der Anwendung ist die eingesetzte Methodik samt Software. In allen damals üblichen Ansätzen aus den Fachgebieten ‚Künstliche Intelligenz' und ‚Computer Science' wurden die Bildfolge und die Lage der Objekte in konsekutiven Bildern als primäre Messgrößen gewählt. Nach Inversion der perspektivischen Abbildung und anschließender Differenzbildung zwischen den Resultaten aufeinander folgender Bilder wurde dann auf die zeitliche Bewegung geschlossen. Diese Differentiation vergrößert das Messrauschen und die Totzeit bis zum Erhalt der neuen, aktuellen Schätzwerte.

Im Gegensatz dazu haben wir von Anfang an mit dynamischen Modellen im 3-D Raum für den zu beobachtenden *Prozess* gearbeitet, also mit *räumlich-zeitlichen Strukturen*. Die Verbesserung der Schätzwerte erfolgt dann durch Rückkopplung von Vorhersagefehlern; die hier erfolgende zeitliche Integration mittels der Differenzengleichungen für den zu beobachtenden Prozess reduziert das Messrauschen und erlaubt, auch Ableitungsgrößen (wie Geschwindigkeitskomponenten) in einem Durchgang mit zu schätzen. Bei vorliegender Beobachtbarkeit können sogar nicht direkt messbare Größen wie die bei perspektivischer Abbildung verloren gegangene Entfernung rekonstruiert werden, ein wesentlicher Vorteil ! Dies führt zur Fähigkeit des monokularen Bewegungs-Stereosehens.

Bei von Anfang an hoher Auswertefrequenz (1/4 Videorate = 12,5 Hz, 80 ms Zykluszeit) bilden höhere Fahrgeschwindigkeiten keine besonderen Schwierigkeiten. Bei einer Sicht von 6 bis 30 m und einer Geschwindigkeit von 108 Km/h (30 m/s) werden alle Abschnitte der Fahrbahn achtmal nacheinander mit verschiedenen Auflösungen erfasst, was sowohl eine Erkennung der Krümmungsparameter sowie der eigenen seitlichen Ablage gestattet. Dies ist bei Hindernisfreiheit alles, was man zum sicheren Fahren braucht.

2. Ein alternativer Ansatz zum Echtzeit-Sehen (aus der Systemdynamik)

Nimmt man im konventionellen deutschen Fernsehbild nur eines der Halbbilder (entweder nur alle geraden oder nur alle ungeraden Zeilen) so hat man zwar die vertikale Auflösung halbiert, aber die doppelte Zeit zur Bildinterpretation zur Verfügung. Dieses Halbbild (engl. video field) hatte typischerweise 360 x 120 Bildpunkte (Pixel). Bild 4 zeigt ein typisches Vollbild mit eingezeichneten Auswertefenstern. Ihre Lage und ihre Parameter können von einem

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

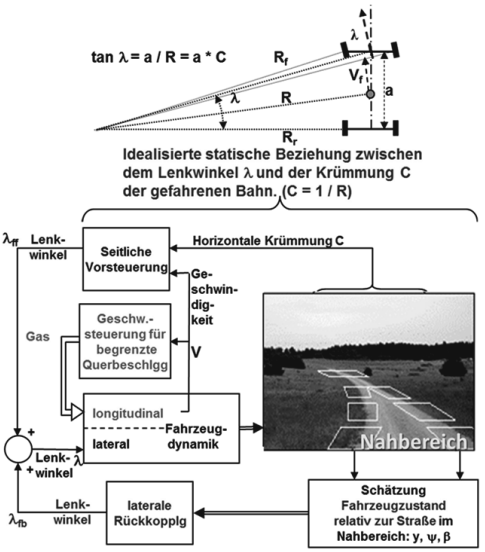


Bild 4: Skizze des Verfahrens zur rekursiven Fahrbahnerkennung und Fahrzeugsteuerung (1986)

zum nächsten Videozyklus der Situation angepasst werden. Ein Modell mit Variablen der Differentialgeometrie für den Krümmungsverlauf der Fahrbahn gestattet mit der Lenkgeometrie (oben im Bild) die Festlegung eines angemessenen Ausschlags für den niederfrequenten Lenkwinkel λ_{ff} (oben links) sowie der maximalen Geschwindigkeit, wenn eine Grenze in der Querbeschleunigung einzuhalten ist. Sie wird über die Stellglieder Gas und Bremse geregelt.

Im Nahbereich (unten im Bild) ist aus der Lage der Fahrbahnkanten die laterale Position des eigenen Fahrzeugs auf der Fahrbahn abschätzbar. Deren Abweichung vom gewünschten Sollwert wird durch eine geeignete Rückkopplung der Fehler korrigiert (λ_{fb} unten links). Bei dieser Vorgehensweise ist keine Sollbahn zu berechnen; die Dynamik des gewünschten Verhaltens kann mit den bewährten Methoden der Systemdynamik und Regelungstechnik festgelegt werden [4 bis 7].

2.1 Integrierte räumlich / zeitliche Modelle für den realen Prozess

Gemäß Bild 5 wird parallel zur Beobachtung des realen Prozesses in der Welt über Fernsehsignale (links im Bild) durch Merkmalvergleich im Auswerteprozess (rechtes Quader) eine Vorstellungswelt aufgebaut mit Prozessmodellen in Raum (je nach Bedarf bis zu drei Raumdimensionen) und Zeit. Die Initialisierung ist der kritische Schritt, bei dem aus der Kombination von Merkmalen in der Bildfolge Hypothesen von Objekten in der beobachteten Welt und deren Relativposition gebildet werden müssen. Mit den ebenfalls hypothetischen Prozessmodellen sowie den perspektivischen Abbildungsgesetzen werden dann die Lagen der Merkmale im nächsten Bild vorhergesagt; dies erlaubt die Einschränkung der horizontalen und vertikalen Suchbereiche im Bild. Mit den Vorhersagefehlern und der Jacobi'schen Matrix der Abbildungsgleichungen (Matrix der Ableitungen der Mess- nach den

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

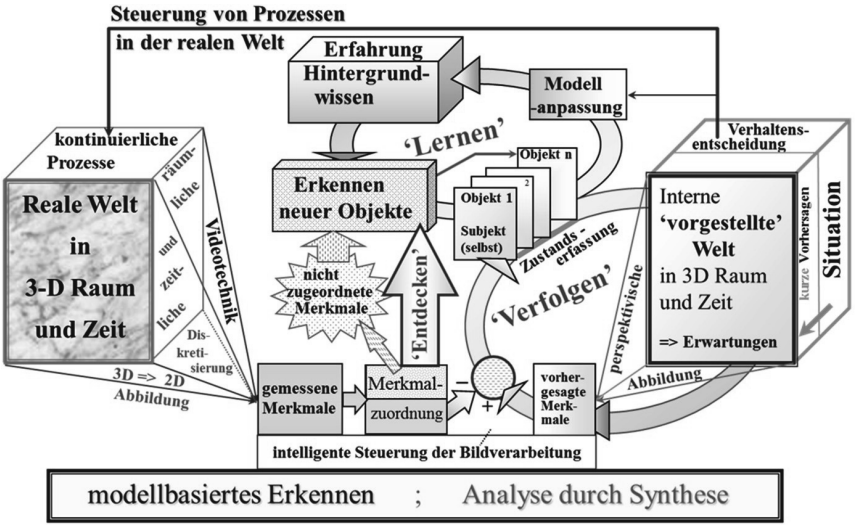


Bild 5: Aufbau einer Vorstellung über die beobachtete Welt durch Rückkopplung von Vorhersagefehlern für markante Merkmale und Objektpositionen; drei parallele Aktivitäten: Entdecken neuer Merkmale und Generierung von Objekthypothesen, verfolgen von Objekten, und Modellanpassung (Lernen).

Zustandsgrößen) können dann die Modellvorstellungen verbessert werden (Erweitertes Kalman Filter EKF). Einzelheiten sind zu finden in [4 bis 10], speziell [7, Kap. 6 und 7]. Drei Prozesse laufen stets parallel: 1. Das Entdecken neuer Merkmale und die Bildung neuer Objekthypothesen (Bildmitte), 2. Das Verfolgen von Objekten (rechts) mit bekannten Hypothesen, und 3. Eine Buchführung über interne Prozessabläufe, die zum Lernen verwendet werden kann (oben).

2.2 Das Fensterkonzept zur Echtzeit-Merkmalextraktion in Bildfolgen

Wie aus Bild 3 ersichtlich, war vor 1997 Bildfolgenauswertung in Echtzeit mit kommerziellen µP nicht möglich. Das dynamische Fensterkonzept in Kombination mit dem 4-D Ansatz [4; 7, Kap. 5] wurde als einzige Möglichkeit gesehen, mit verfügbaren µP in gut strukturierten Szenen dieses Ziel zu erreichen. Fahren auf Schnellstraßen wurde als leichteste praktisch relevante Anwendung schon Ende der 1970er Jahre erkannt. Hierfür wurde ein ‚Hardware-In-the-Loop' (HIL) Simulationskreis aufgebaut, in dem das Fensterkonzept gemäß Bild 6 syste-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

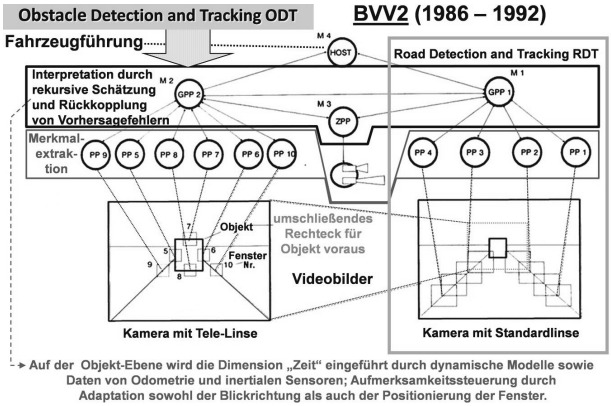


Bild 6: Das Fensterkonzept mit flexibel anpassbaren reduzierten Auswertebereichen für N Objekte parallel erlaubte frühes Echtzeit-Sehen auf Straßen ab 1985.

matisch untersucht werden konnte. Jedem der parallelen µP wurden für jeden Auswertezyklus neu einige 32 x 32 Pixel große Bildbereiche vom Auswerteprozess mit günstigen Parametern für die Suche zugewiesen. Merkmale waren Kanten mit einem Winkelbereich für die Neigungen und für angrenzende mittlere Grauwerte. Für jedes Objekt wurden Gruppen von Merkmalen definiert (s. rechte Hälfte für die Fahrbahn, linke für ein einzelnes Objekt in Bild 6). Bei Fahrzeugen als Hindernissen kamen nur vertikale und horizontale Kanten in Frage, da nur der untere Körperteil analysiert wurde; der obere Teil bei PKW mit Scheiben und polierten Flächen liefert in der Regel durch Spiegelung der Umgebung schnell variable, wenig verlässliche Bildmerkmale [7 bis 10].

3. Das Projekt „PROMETHEUS“-ProArt 1987 – 94

Nachdem mit VaMoRs 1986/87 auf alleinige Initiative der UniBwM die prinzipiell möglichen Fähigkeiten demonstriert worden waren, zeigte sich das mittlere Management der Daimler-Benz AG (DBAG) daran interessiert, gemeinsame Projekte über Drittmittel finanzieren zu lassen. Nach Einrüstung unseres BVV2 in einen dort vorhandenen ‚Spur Bus‘ im Rahmen des BMFT-Projektes ‚Autonom Mobile Systeme‘ mit erfolgreichem autonomem Anhalten vor einem stationären Hindernis aus 40 km/h auf der Versuchsstrecke Rastatt 1988 gelang es, die bis dahin im Prometheus-Projekt geplante laterale Führung durch vergrabene Kabel und induktive Felder auf Autobahnen durch maschinelles Sehen zu ersetzen. Der zunächst für die DBAG mit einer Kopie unseres BVV2 ausgerüstete 7t-Van ‚Vision Information Technology Application‘ VITA brachte auf der Halbzeitdemonstration Prometheus 1991 bei FIAT in Turin auch den Durchbruch beim oberen Management der Autoindustrie. Für die Abschlussdemonstration 1994 in Paris wurde ein sehr ehrgeiziges Ziel gesetzt: Man wollte

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

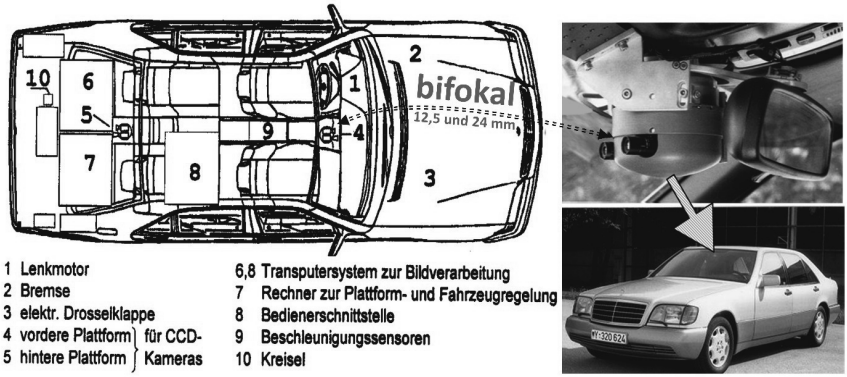


Bild 7: VaMoRs-PKW (kurz VaMP), das gemeinsam mit dem Zwillingsfahrzeug der DBAG Mercedes 500-SEL (VITA2 als CED2) zur Abschlussdemonstration von Prometheus 1994 autonom im französischen dreispurigen Autoroute-Verkehr mit 1 Gast an Bord als CED 3 mitfuhr (bei VITA2 mit 3 Gästen war alle Elektronik im Kofferraum).

mit Gästen an Bord auf einer Autobahn am dortigen Flughafen CDG autonom im normalen dreispurigen Verkehr mitfahren können. Um das Ziel zu erreichen, wurden an der UniBwM zeitweise bis zu 20 Mitarbeiter vom Prometheus-Projekt finanziert. Folgende Leistungen wurden mit diesen damals einzigen dazu fähigen und weltweit schnellsten autonomen Fahrzeugen (Bild 7) mit dem Sehsystem der UniBwM auf Transputer-Basis erzielt [10 bis 15; und 7, Kap. 11]:

+ Erfassung der Parameter der eigenen Spur und der beiden direkten Nebenspuren,
+ Freies Spurfahren mit Geschwindigkeiten bis zu den erlaubten max. 130 km/h auf französischen Autobahnen,
+ Konvoi-Fahren mit geschwindigkeitsabhängigem Abstand (inklusive Anhalten),
+ Übergang in diesen Modus vom freien Spurfahren aus,
+ Vollautonome Spurwechsel und Überholen unter Beachtung von je bis zu fünf benachbarten Fahrzeugen in der vorderen und der hinteren Hemisphäre.

Die erfolgreichen Vorentwicklungen mit VaMoRs zur benötigten Technik führten dazu, dass uns vom zuständigen Sicherheitsbeauftragten der Bundeswehr erlaubt wurde, ab 1992 im öffentlichen Straßenverkehr autonom mitzufahren und zu testen, wenn drei Menschen zur Überwachung der Sicherheit an Bord waren; dies war ein wesentlicher Vorteil gegenüber

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

privaten Experimentatoren. Ohne dieses großzügige Entgegenkommen wäre das gesetzte Ziel wohl kaum erreichbar gewesen.

Parallel zu den Arbeiten im Prometheus-Projekt auf Autobahnen wurden im Bereich der allgemeinen Anwendungen auf Straßen niederer Ordnung mit VaMoRs die Fähigkeiten entwickelt, Querstraßen zu entdecken und deren Schnittparameter (Abstand, Breite, Winkel) zu schätzen [15; 7, Kap. 10]. Auch hierbei hat anfänglich der HIL-Simulationskreis eine wesentliche Rolle gespielt.

4. Zwei Gabelungen der Entwicklung des maschinellen Sehens (1997 und 2001)

In den Jahren 1995/96 wurde das entwickelte Sehsystem auf etwa um das Zehnfache leistungsfähigere µP (Motorola Power-PC) im Rahmen eines EU-Projektes übertragen. Neben der Erhöhung der Bildauswerterate auf 25 Hz konnte die Zahl der benötigten COTS-Prozessoren für die Bildauswertung auf ein Fünftel reduziert werden [13; 14]. Mit diesem System wurde 1995 die Langstreckentestfahrt von München nach Odense zu einem Projekt-Treffen durchgeführt (Summe > 1600 km autonom gefahrene Teilstrecken) [14; und 7, Sektion 9.4.2.5].

Da Daimler wie die meisten anderen Industriefirmen anschließend nur an weniger anspruchsvollen Sehsystemen interessiert war, haben sich die Wege 1997 getrennt. Wegen der hohen Anfangskosten bei maschinellem Echtzeitsehen waren wir der Überzeugung, dass sich diese Systeme vor allem mit der Fähigkeit zum flexiblen Mehrfacheinsatz in der Praxis rechnen würden. Deshalb waren wir von vorne herein daran interessiert, Systeme zu entwickeln, die sich langfristig den Fähigkeiten des menschlichen Sehvermögens annähern können, d.h. die flexibel und lernfähig sind (oder zumindest werden können).

Industrie (geringe Systemkomplexität): 1. Bildauswertung für nur eine Aufgabenklasse, 2. Eine oder zwei Kameras körperfest montiert; 3. Niedrige aktuelle Kosten und erforderliche Rechenleistung 4. Kleine Wissensbasis, 5. Die Schätzung von Abständen erfolgt primär mit aktiven Sensoren (Radar oder Lidar).

Forschung (UniBwM: Erkenntnisgewinn mittels Sehen): 1. Langfristaspekte der flexiblen Mehrfachnutzung in Aufgabenbereichen dominieren. 2. Datenökonomie erfordert multiple Brennweiten parallel mit aktiver (zum Teil sehr schneller) Blickrichtungssteuerung (Sakkaden); 3. inertiale Stabilisierung mittels einfacher Drehratengeber auf einer Plattform; 4. Umfangreiche Wissensbasen auf verschiedenen Ebenen erlauben einfache Adaptation an Aufgaben und Situationen. 5. Auf aktive Sensoren wie Radar und Lidar wird analog zum menschlichen Wahrnehmen verzichtet.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Durch unsere Erfolge mit den Transputer-Systemen sowie den gezeigten Fahrleistungen nicht nur auf Autobahnen, die ständig auf internationalen Konferenzen präsentiert wurden, zeigte sich der amerikanische Verteidigungsbereich an einer Zusammenarbeit interessiert. In USA wurde Anfang der 90er Jahre die Entwicklung autonomer Bodenfahrzeuge von der DARPA weg und hin zum Army Research Laboratory (ARL), Aberdeen MD verlagert. Unter dessen Federführung wurde 1996/97 im Rahmen eines ‚Memorandum of Understanding' zwischen den Verteidigungsbereichen zusammen mit dem ‚National Institute of Standards and Technology' (NIST, Gaithersburgh, MD, J. Albus [19; 20]) sowie der Forschungsgruppe SRI (Princeton, NJ, P. Burt) und einem amerikanischen Industriepartner (General Dynamics, Robotik) das Projekt „AutoNav" definiert. Auf deutscher Seite war die Fa. Dornier GmbH, Friedrichshafen beteiligt, die das mit VaMoRs zu entwickelnde System auf das Kettenfahrzeug Wiesel2 (einen digitalen Versuchsträger) portieren sollte.

Ziel war die Entwicklung flexibler Fähigkeiten in visueller Wahrnehmung, Aktionsplanung und Missionsdurchführung, so dass bis 2001 kleinere Missionen auf Wegenetzen niederer Ordnung einschließlich querfeldein-Anteilen mit der Vermeidung negativer Hindernisse (speziell eines Grabens) autonom durchgeführt werden konnten. Die genaue Geometrie des Wegenetzes und der Übergänge sollte nicht vorab als Wissen eingegeben werden müssen, sondern war bei der Durchführung der Mission vor Ort zu erkennen; dies bezeichnen wir heute als „Pfadfinder-Sehen" (Scout-type Vision). Zur Lösung dieser Problemstellung wurde das „Erwartungsbasierte, Multifokale, Sakkadische" Sehen (Expectation-based, Multi-focal, Saccadic- or EMS-Vision) entwickelt [17; 18a) bis 18f); weiter bis 25] und [7, Kap. 13/14]. Details finden sich auf der Website [27] sowie unter Youtube [28]. Bild 8 zeigt die Abschluss-Demonstration im Jahr 2001 in Neubiberg, bei der die angestrebten Ziele erreicht wurden.

Aufgrund ähnlicher Demonstrationen unserer amerikanischen Partner mit deren Fahrzeugen (HMMWV's und XUV, e**X**perimental **U**nmanned **V**ehicle) in USA gelang es dort, in den Budgetberatungen des Verteidigungs-Haushalts 2001 vom US-Congress das Ziel schriftlich festzulegen, dass bis 2015 ein Drittel der Kampf-Bodenfahrzeuge der USA die Fähigkeit haben sollte, Missionen teilweise autonom durchzuführen.

Auf dieser Basis hat die DARPA dann zunächst für 2004 einen Preis in Höhe von 1 Million $ für die Gruppe ausgeschrieben, die zu dem Termin zeigen konnte, dass ihr Fahrzeug ***eine Versorgungsmission*** über mehr als 200 km in der kürzesten Zeit autonom durchführen konnte. Allerdings wurden die Anforderungen dadurch erleichtert, dass eine genaue momentane Positionsvermessung durch GPS zur Verfügung stand und dass die Fahrstrecke durch eng gestaffelte GPS-Wegpunkte vorgegeben wurde. Negative Hindernisse (Gräben etc.) wurden ausgeschlossen, und zur Entdeckung von positiven Hindernissen (oberhalb der

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

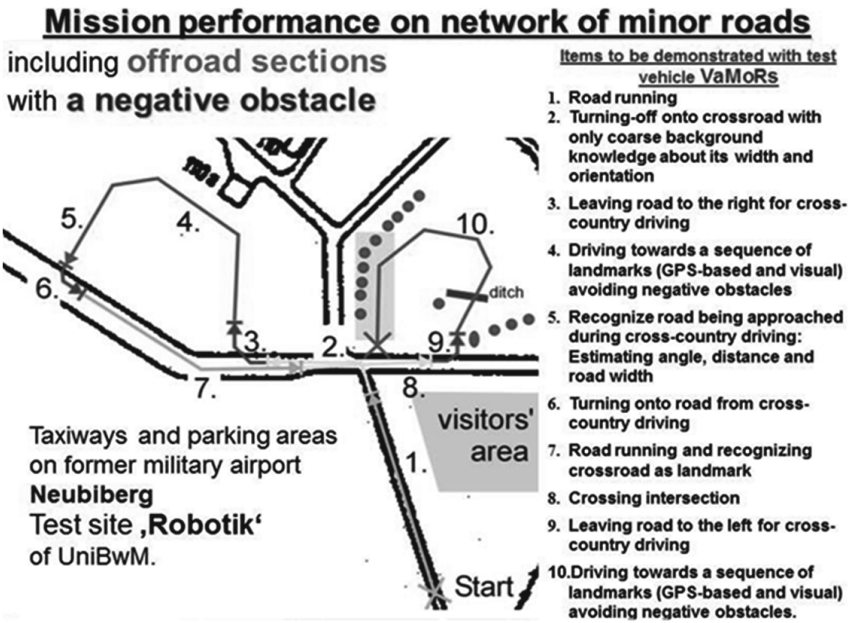


Bild 8: Autonome Missionsdurchführung in einem Wegenetz niederer Ordnung mit 2-maligem Verlassen zur Querfeldeinfahrt und wieder Auffahren auf die befestigte Straße. Im Schlusssektor 9-10 befindet sich ein Graben als negatives Hindernis an unbekannter Stelle.

Fahrebene) standen leistungsfähige Laser-Range-Finder zur Verfügung. Maschinelles Sehen spielt unter diesen Umständen keine wesentliche Rolle und wurde von einigen Gruppen auch ignoriert. Da genaue Wegekarten zur Verfügung standen, wurde visuelle Wahrnehmung vor allem dafür eingesetzt, die in der aktuellen Wissensbasis über die momentane Umgebung vorliegende Information über (markante) stationäre Objekte zu bestätigen; aus diesem Grund wird diese reduzierte Sehfähigkeit hier als „Bestätigungs-Sehen" (Confirmation-type Vision) bezeichnet. Diese neue Entwicklungslinie mit geringeren Anforderungen an die visuellen Wahrnehmungsfähigkeiten (vor allem die erforderlichen Wissensbasen) erfreut sich seither in großen Teilen der Forschung und der Industrie großer Beliebtheit. Dies ist die zweite Gabelung der Entwicklungslinien, die mit den DARPA-Challenges 2004++ begann. Für anspruchsvollere autonome Fahrzeuge, die sich mit ihren Wahrnehmungsfähigkeiten der

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

menschlichen integrierten Erfassung von Raum und Zeit annähern sollen, ist ‚Scout-type Vision' nötig. Die beiden Typen sind folgendermaßen zu charakterisieren:

Pfadfinder-Typ (Scout-type): Die Fähigkeit, in unbekannter Umgebung ohne weitere Hilfen zu fahren, erfordert einen hinreichend großen Satz von Bildmerkmalen (hohe Auflösung, Farbe, Texturen) sowie große spezifische Wissensbasen über: a) Erzeugung und Test von Objekthypothesen aus Bildmerkmalen (4-D Ansatz); b) klassenspezifische Fähigkeiten zur Manöverdurchführung, c) Domänen-spezifische Situationen zu deren aktueller Erfassung und zur Entscheidungsfindung. Multifokales Sehen mit hoher zentraler Auflösung und aktiver Blickrichtungssteuerung sind nötig für bessere Dateneffizienz. Farbsehen erleichtert die Erkennung komplexer Situationen. Inertiale Blickstabilisierung ist wichtig für das Fahren auf unebenem Untergrund und für die Blickfixierung auf (sich bewegende) Objekte. Diese Systeme haben großes Wachstumspotential und gute Lernfähigkeiten wegen der großen Signalvielfalt und der spezifischen sowie allgemeinen Wissensbasen (Farben, Texturen).

Bestätigungssehen (Confirmation-type): Fahren ist nur in vorabgeklärten Umgebungen mit GPS und genauen Landkarten möglich. Ein reduzierter Satz an Bildauflösungen und Merkmalen kann hinreichen. Dieser Typ erfordert große, möglichst aktuelle lokale Datenbasen sowie GPS und hochgenaue Landkarten mit stationären Objekten; er kommt mit bescheideneren Wissensbasen aus, hat aber hohe laufende Kosten wegen der erforderlichen Aktualität der Umweltdaten. Bis heute erfordert er 360°-Laser (mit meist mäßigen Auflösungen in größerer Entfernung > ~ 60m); für diese ist eine aufwendige Synchronisation erforderlich; körperfeste Montage der Sensoren und einfache Kameras reichen meist. Dieser Typ ist prädestiniert für ebenes Gelände und gute Lichtbedingungen; er hat vergleichsweise wenig technologisches Wachstumspotential.

Bewegte Objekte und Subjekte erfordern ähnliche Fähigkeiten in beiden Bereichen.

5. Ausblick

Seit den DARPA Grand- und Urban Challenges 2004 bis 2007 und im Anschluss daran lag das Schwergewicht der weltweiten Entwicklung autonomer Straßenfahrzeuge auf ‚Confirmation-type' Vision mit 360° Rundum-Laser-Scannern auf dem Dach. Die verfügbaren Rechenleistungen erlaubten hier mit relativ geringem Aufwand in der Software-Entwicklung akzeptable Lösungen für einfache Anwendungen im normalen Straßenverkehr (s. z. B. [29]). Seither ist das Gebiet ‚Autonomes Fahren' auch dank der Entwicklungen in den Bereichen Radar- und Laser-Technologie weltweit explosionsartig ausgedehnt worden. Nach den jetzt schon verfügbaren Fahrer-Assistenzsystemen werden bald auch die ersten Fahrzeuge mit voll autonomen Fähigkeiten auf Schnellstraßen auf dem Markt angeboten werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

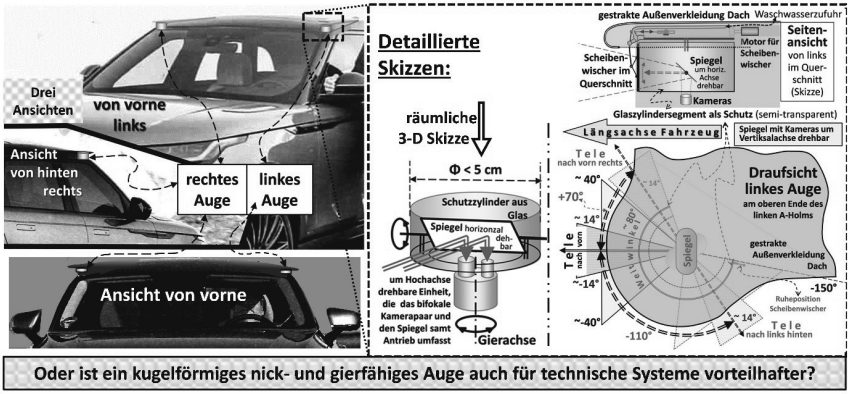


Bild 9: Kann so das langfristige Entwicklungsergebnis sehender Bodenfahrzeuge mit der Leistungsfähigkeit des menschlichen Gesichtssinns aussehen? Redundanz durch zwei Augen, dadurch auch binokulares Stereosehen, Blickstabilisierung durch inertiale Rückkopplung, Fähigkeit zur hochauflösenden aktiven Objektverfolgung.

In Anbetracht der höchstentwickelten Sehsysteme im biologischen Bereich drängt sich die Frage auf, ob nicht langfristig auch maschinelle Sehsysteme vom Pfadfinder-Typ eine leistungsfähigere und wirtschaftlichere Alternative gegenüber den bisher favorisierten vom Typ Bestätigungssehen sein könnten. Bild 9 zeigt als grobe Skizze eine von vielen möglichen Ausformungen. Eine Abschätzung, wie viele Jahrzehnte wir von einer solchen Entwicklungsstufe entfernt sind, ist derzeit wohl kaum möglich. Einige Untersuchungen in diese Richtung werden bei [30] durchgeführt.

Literatur:

[1] Wikipedia: Wheels: History

[2] Dickmanns E.D.: Vision for Ground Vehicles – History and Prospects. Int. J. of 'Vehicle Autonomous Systems' (IJVAS), Vol.1, No.1, 2002, pp. 1 – 44.

[3] Roland, A., Shiman, P.: Strategic Computing: DARPA and the Quest for Machine Intelligence, 1983–1993. MIT Press 2002

[4] Dickmanns, E.D.: 4-D-Dynamic Scene Analysis with Integral Spatio-Temporal Models. 4th International Symposium on Robotics Research, Santa Cruz 1987. In: Bolles R.C.; Roth B.: Robotics Research. MIT Press, Cambridge 1988, S. 311-318.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[5] Wünsche H.-J.: Erfassung und Steuerung von Bewegungen durch Rechnersehen. UniBw München, LRT Diss. 1988

[6] Zapp, A.: Automatische Straßenfahrzeugführung durch Rechnersehen. UniBw München, LRT Diss. 1988

[7] Dickmanns, E.D.: Dynamic Vision for Perception and Control of Motion. Springer 2007

[8] Dickmanns E.D.; Graefe V. 1988: a) Dynamic monocular machine vision. Machine Vision and Applications, Springer International, Vol. 1, pp 223-240. b) Applications of dynamic monocular machine vision. (ibid), pp 241-261

[9] Mysliwetz B.: Parallelrechnerbasierte Bildfolgeninterpretation zur autonomen Fahrzeugführung. UniBw München, LRT Diss. 1990

[10] Vier Beiträge in Masaki (ed): Proc. of Int. Symp. on Intell. Vehicles'94, Paris, Oct. 1994:

a) Dickmanns E.D.; Behringer R.; Dickmanns D.; Hildebrandt T.; Maurer M.; Thomanek F.; Schiehlen J.: The Seeing Passenger Car 'VaMoRs-P'. pp 68-73 Abstract , pdf

b) Thomanek F.; Dickmanns E.D.; Dickmanns D.: Multiple Object Recognition and Scene Interpretation for Autonomous Road Vehicle Guidance. pp. 231-236 Abstract

c) Von Holt: Tracking and Classification of Overtaking Vehicles on Autobahnen. pp 314-319

d) Schiehlen J.; Dickmanns E.D.: A Camera Platform for Intelligent Vehicles. pp 393-398

[11] Brüdigam C.: Intelligente Fahrmanöver sehender autonomer Fahrzeuge in autobahnähnlicher Umgebung. UniBw München, LRT Diss. 1994

[12] Schiehlen J.: Kameraplattformen für aktiv sehende Fahrzeuge. UniBw München, LRT Diss. 1995

[13] Thomanek F.: Visuelle Erkennung und Zustandsschätzung von mehreren Straßenfahrzeugen zur autonomen Fahrzeugführung. UniBw München, LRT Diss. 1996

[14] Behringer R.: Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurverlaufes durch Rechnersehn für ein autonomes Straßenfahrzeug. UniBw München, LRT Diss. 1996

[15] Müller N. 1996: Autonomes Manövrieren und Navigieren mit einem sehenden Fahrzeug. UniBw München, LRT Diss. 1996

[16] Dickmanns Dirk: Rahmensystem für die visuelle Wahrnehmung veränderlicher Szenen durch Computer. UniBw München, Fak. Informatik, Diss. 1997

[17] Dickmanns E.D.: An Expectation-based, Multi-focal, Saccadic (EMS) Vision System for Vehicle Guidance. In Hollerbach and Koditschek (eds.): ‚Robotics Research' (The Ninth Symposium), Springer-Verlag, 1999

[18] Sechs Beiträge in zu EMS-Vision in den Proceedings of the Internat. Symp. on Intell. Vehicles (IV'2000), Dearborn, (MI, USA), 2000 Oct. 4-5: {DED = Dickmanns, E.D.}

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

a) Gregor, R., Lützeler, M., Pellkofer, M., Siedersberger, K.H., DED: EMS-Vision: A Perceptual System for Autonomous Vehicles. pp 52-57
b) Pellkofer, M., DED: EMS-Vision: Gaze Control in Autonomous Vehicles. pp 296-301
c) Lützeler, M., DED: EMS-Vision: Recognition of Intersections on Unmarked Road Networks. pp 302-307
d) Gregor, R., DED: EMS-Vision: Mission Performance on Road Networks. pp 468-473;
e) Hofmann, U.; Rieder, A., DED: EMS-Vision: Application to Hybrid Adaptive Cruise Control. pp 468-473
f) Siedersberger K.-H., DED: EMS-Vision: Enhanced Abilities for Locomotion.

[19] Albus J.S.: 4-D/RCS reference model architecture for unmanned ground vehicles. Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, 2000, April 24-27

[20] Albus J.S., Meystel A.M.: Engineering of Mind. – An Introduction to the Science of Intelligent Systems. Wiley Series on Intelligent Systems, 2001

[21] Lützeler M.: Fahrbahnerkennung zum Manövrieren auf Wegenetzen mit aktivem Sehen. UniBw München, LRT Diss. 2002

[22] Gregor R.: Fähigkeiten zur Missionsdurchführung und Landmarkennavigation. UniBw München, LRT Diss. 2002

[23] Pellkofer M.: Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung. UniBw München, LRT Diss. 2003

[24] Von Holt V.: Integrale Multisensorielle Fahrumgebungserfassung nach dem 4-D Ansatz. UniBw München, LRT Diss. 2004

[25] Siedersberger K.H.: Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-) autonomen Fahrzeugen. UniBw München Diss. 2004

[26] Hofmann U.: Zur visuellen Umfeldwahrnehmung autonomer Fahrzeuge. UniBw München, LRT Diss. 2004

[27] **www.dyna-vision.de**

[28] Dickmanns E.D.: **http://www.youtube.com/watch?v=YZ6nPhUG2i0** ; a one-hour slide- and video-clip talk under the heading “Dynamic Vision as Key Element for Artificial General Intelligence” (Tech-Talk 2011 at AGI, Mountain View, CA)

[29] Jährliche Konferenz: ‚International Symposium on Intelligent Vehicles‘, (kurz IV’{letzte_zwei_Ziffern_der_Jahreszahl}: IV’xy; seit IV’92 für das Startjahr 1992)

[30] **www.unibw.de/tas**, Website TAS, LRT8, UniBw München

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Ethik und Risiko. Zur Akzeptanz selbstfahrender Autos

Prof. Dr. rer. nat. Armin Grunwald,
Institut für Technikfolgeabschätzung und Systemanalyse (ITAS),
Universität Karlsruhe

1. Einleitung und Überblick

Selbst fahrende Autos sind innerhalb kurzer Zeit zu einem großen gesellschaftlichen Thema geworden. Schien das autonome Fahren vor wenigen Jahren noch entfernte Zukunftsmusik zu sein, so haben Fortschritte der Technik und medienwirksame Inszenierungen, aber auch Unfälle mit mehr oder weniger autonomen Fahrzeugen demonstriert, dass wir an der Schwelle eines neuen Zeitalters der Mobilität stehen. Dass hier Bürger und Verbände hellhörig werden ist kein Wunder, ist doch das Autofahren seit Jahrzehnten ein zentrales Symbol des modernen Menschen und seiner Freiheit. Da wird jede mögliche Änderung vertrauter Gewohnheiten gleich zum Thema, und es werden Risiken und ethische Herausforderungen thematisiert.

Das autonome Fahren stellt in vieler Hinsicht eine attraktive Innovation für die Zukunft der Mobilität dar. Mehr Sicherheit, ein Gewinn an Komfort, die Nutzung der für das Fahren benötigten Zeit für andere Zwecke und Effizienzgewinne auf Systemebene gehören zu den vielfach erwarteten Vorteilen (Maurer et al. 2015). In Systemen und Technologien autonomen Fahrens sind jedoch - wie ganz grundsätzlich bei Technik - Fehler nicht auszuschließen, die zu Unfällen mit Sach- oder Personenschäden führen können. Die zentrale Rolle von Software kann zu systemischen Risiken führen, wie aus der Internet- und Computerwelt hinlänglich bekannt. Auch an ökonomische Risiken ist zu denken, z.B. für die Automobilindustrie oder den Arbeitsmarkt, genauso wie an soziale Risiken etwa für Privatheit. Frühzeitige und umfassende Analyse und Bewertung möglicher Risiken des autonomen Fahrens sind unabdingbarer Bestandteil eines verantwortlichen Forschungs- und Innovationsprozesses und damit gleichermaßen notwendige Bedingungen einer individuellen wie auch allgemeinen gesellschaftlichen Akzeptanz.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Gesellschaftliche Risikokonstellation autonomen Fahrens

Die zentrale risikoethische Frage ist, unter welchen Bedingungen das Eingehen von Risiken (im aktiven Fall) bzw. ihre Zumutung (im passiven Fall) gerechtfertigt werden kann. Häufig wird zwischen der faktischen *Akzeptanz* von Risiken und der normativ erwarteten Akzeptanz, der so genannten *Akzeptabilität* unterschieden (Grunwald 2005). Während die Akzeptanz im individuellen Ermessen liegt, wirft die Akzeptabilität ethische Fragen auf: warum und unter welchen Bedingungen darf man andere Menschen Risiken aussetzen? Also sind verbreitete Fragen des Typs, wie groß das Risiko bestimmter Maßnahmen oder neuer Technologien sei, zu pauschal und verdecken die vielfältigen Differenzierungen in Bezug auf Schadenswahrscheinlichkeit, Schadensgröße und – besonders wichtig aber oft vernachlässigt – ihre Verteilung. Eine adäquate und sorgfältige Diskussion von Risiken muss kontextbezogen und differenzierend vorgehen (dieser Abschnitt folgt Grunwald 2015).

Mit Autounfällen sind wir aus dem seit über hundert Jahren etablierten Straßenverkehr sehr gut vertraut. Sie involvieren nur ein oder wenige Fahrzeuge, führen zu Schäden bei einer begrenzten Anzahl von Menschen und haben ökonomisch begrenzte Auswirkungen. Für diesen Risikotypus kleinräumiger Unfälle ist ein umfangreiches und ausgereiftes System aus Rettungskräften, Unfallmedizin, Haftungsrecht und Versicherungen etabliert. Individuelle Unfälle verursacht durch autonome Fahrzeuge können voraussichtlich weitgehend innerhalb des bestehenden Systems behandelt werden. Allerdings ist die erforderliche Weiterentwicklung des Haftungsrechts keine triviale Aufgabe.

Unfallrisiken dieser Art sind zum einen die Nutzer autonomer Fahrzeuge *als Insassen* ausgesetzt. Dabei entscheiden sie selbst, ob sie sich diesen Risiken aussetzen wollen oder nicht, also durch Nutzung eines autonomen Fahrzeugs oder durch Verzicht. Durch Unfallrisiken des autonomen Fahrens können aber auch andere Verkehrsteilnehmer gefährdet werden, selbstverständlich auch solche, die sich nicht am autonomen Fahren beteiligen. Diesen Risiken kann man sich theoretisch dadurch entziehen, dass man nicht am Straßenverkehr teilnimmt - das wäre jedoch mit erheblichen Einschränkungen verbunden. Von daher handelt es sich beim Umgang mit Risiken des autonomen Fahrens um ein komplexes Aushandlungs- und Regulierungsthema, in dem nicht nur das Markt-, sprich Kaufverhalten, entscheidend, sondern auch Gemeinwohlfragen wie eine mögliche Gefährdung anderer bzw. deren Schutz zu thematisieren sind. Hierfür bedarf es demokratisch und rechtlich abgesicherter Verfahren (Zulassungsverfahren, Behörden, Überprüfungen, Straßenverkehrsordnung, Produkthaftung etc.).

https://doi.org/10.51202/9783181022824 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Diese Risiken und auch ihre komplizierte Verteilung sind nicht neu, sondern als tägliche Praxis im Straßenverkehr omnipräsent und gesellschaftlich auch akzeptiert. Dass beispielsweise gegenwärtig in Deutschland jährlich über 3.000 Verkehrstote zu beklagen sind, führt nicht zu Protesten, Ablehnung des Autoverkehrs oder massivem Druck zu Veränderungen. Letzteres war anders in den frühen 1970er Jahren, als es allein in Westdeutschland bei nur etwa einem Zehntel des heutigen Verkehrsaufkommens zu über 20.000 Verkehrstoten jährlich kam. Es wurden Maßnahmen ergriffen, vor allem zur Steigerung passiver Sicherheit, die zu einer deutlichen Verringerung dieser Todesraten geführt haben. Entscheidend für einen gesellschaftlichen Risikovergleich des bisherigen Systems mit einem zukünftigen System unter Einbezug des autonomen Fahrens wird sein, dass die Gesamtzahl der Verkehrsunfälle und der dadurch bedingten Schäden deutlich reduziert wird.

Die gesellschaftliche Risikobewertung ist ein komplexer Prozess. Zunächst ist zu beachten, dass für Risikobewertungen Vergleiche ganz wichtig sind. Wir beurteilen neue Risikoformen dadurch, dass wir sie in Beziehung zu bekannten Risikoformen setzen. Hierzu liegt beim autonomen Fahren mit dem traditionellen Autofahren eine bekannte Risikokonstellation vor, die als zentraler Vergleichsmaßstab herangezogen werden kann und sollte. Insofern in diesem Vergleich das autonome Fahren deutlich und unzweifelhaft besser abschneiden würde (also mehr Sicherheit, weniger Unfallrisiken), wäre dies ein ganz wichtiger Punkt der gesellschaftlichen Risikobewertung.

Zu bedenken ist auch, dass die Risiken des autonomen Fahrens überschaubar in mehrfacher Hinsicht erscheinen. Technikbedingte Unfälle dürften mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten, die durch eine intensive Testphase minimiert, aber nicht eliminiert werden kann. Ihre Folgen wären, anders als etwa bei der Kernenergie, sowohl in räumlicher und zeitlicher Hinsicht (vgl. Endlagerproblem hoch radioaktiver Abfälle) als auch in Bezug auf die Zahl der involvierten Menschen und die betroffenen Werte überschaubar. Eine GAU Problematik liegt nicht vor.

Zu einem guten Teil neu ist die mit der Automatisierung des Fahrens möglicherweise verbundene digitale Vernetzung mit all den Folgen für mögliche systemische Risiken, Verletzlichkeit, Datenschutz und Überwachung. Diese werden sicher wichtige Themen einer gesellschaftlichen Debatte auch zum autonomen Fahren sein. Da jedoch diese Herausforderungen auch in einer Vielzahl anderer Handlungsfelder auftreten (zunehmend auch bereits heute bei nicht-autonomen Fahrzeugen), dürften sich daraus kaum spezifische Risikobefürchtungen zum autonomen Fahren entwickeln.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Ein Sonderfall ist die betriebliche Risikobewertung durch die Hersteller, sowohl was den erwarteten Return on Investment als auch mögliche Reputationsprobleme durch Unfälle im Betrieb beinhaltet. Die betriebliche Bewertung muss hierbei zwangsläufig mit extrem unsicheren Annahmen arbeiten, etwa über die Skandalisierungsbereitschaft von Massenmedien und über die Auswirkungen von Skandalisierungen. Hier kann es in beiden Richtungen zu Fehlwahrnehmungen kommen: übertriebene Sorge oder naive Zuversicht. Es ist jedenfalls zu erwarten, dass in einer gesellschaftlichen Perspektive mögliche Skandalisierungen nicht der Technologie des autonomen Fahrens abstrakt, sondern der jeweilig betroffenen Marke konkret angelastet würden. Das mag zwar für die betroffene Marke kein Trost sein; es weist jedoch darauf hin, dass - jedenfalls solange die Nutzen des autonomen Fahrens fraglos anerkannt sind - dieser Problemtyp sich nur auf den Wettbewerb der Hersteller untereinander, nicht aber auf das autonome Fahren als Technologie auswirken würde. Und das ist bei anderen Technologien bereits heute der Fall.

In der Gesamteinschätzung stellt sich die gesellschaftliche Risikokonstellation als tendenziell entspannt dar. Sie ist nicht zu vergleichen mit Gentechnik und Kernenergie: es besteht keine GAU Problematik, der Nutzen ist klar erkennbar, die Einführung erfolgt über einen Markt und nicht über Verordnung ‚von oben'. Und sie würde vermutlich nicht durch ‚Umlegen eines Schalters' von heute auf morgen, sondern allmählich erfolgen (Grunwald 2015).

3. Mensch/Maschine-Schnittstelle: wer hat die Kontrolle?

Im traditionellen Autofahren ist die Rollenverteilung klar: der menschliche Autofahrer übt die Kontrolle aus und ist Bediener eines von sich aus nicht aktiven technischen Systems. Jedoch haben bereits teils seit Jahrzehnten etablierte Assistenzfunktionen das Mensch/Maschine-Verhältnis verändert. Das Automatikgetriebe schaltet eigenmächtig, das ABS und die Spurhaltung greifen in bestimmten Fällen ein. Diese Fälle sind so konzipiert, dass hier ein Eigeninteresse des Fahrers an dieser Art von technischen Eingriffen unterstellt werden kann, so etwa die technische Optimierung einer Notfallbremsung. Zu keiner Zeit jedoch kommt es hierbei zu einer Übernahme der Kontrolle über das Fahren durch die Technik.

Dies ändert sich bei hoch automatisiertem Fahren. Hierbei überträgt der Mensch der Technik die volle Kontrolle über Fahrvorgänge und kann sich zwischenzeitlich anderen Aufgaben zuwenden. Dabei kommt es zu reflexions- und regelungsbedürftigen Konstellationen, die insbesondere die Übergabeprozeduren betrifft. Falls das Fahren in Zukunft soweit automatisiert würde, dass es vollständig autonom erfolgen könnte und der Mensch zum reinen Pas-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

sagier in einem Fahrzeug würde, in dem es für ihn gar keine Interventionsmöglichkeiten mehr gäbe (außer das Ziel der Reise und vielleicht noch andere Modalitäten einzugeben), könnte diese Herausforderung sich wieder auflösen. Denn ein vollständig autonomes (voll automatisiertes) Fahren birgt kein ethisches oder rechtliches Problem für die Mensch/Maschine-Schnittstelle, weil es keine Kooperations- und Übergabenotwendigkeiten mehr gäbe. Natürlich kann philosophisch gefragt werden, ob eine so weitgehende Autonomisierung der Technik „gut" ist, was „gut" hier bedeuten könnte, welche Folgen sie z.B. für das Menschenbild haben kann, ob der Mensch in einem solchen System überhaupt noch die letztliche Kontrolle ausüben könne etc.

Mensch/Maschine-Schnittstellen sind immer dort potentiell problematisch und grundsätzlich regelungsbedürftig, wenn Mensch und Maschine in gemeinsamen Handlungskontexten auftreten und dabei kooperieren müssen, um arbeitsteilig gewünschte Funktionen wie z.B. Sicherheit zu gewährleisten. Insbesondere der Wechsel von Zuständigkeiten zwischen Mensch und Technik für bestimmte Abläufe bedarf der besonderen Betrachtung, weil die Erfüllung der Funktionen (wieder z.B. Sicherheit) zu jedem Zeitpunkt der Übergabe gewährleistet sein muss. Dies gilt entsprechend für alle Formen des hoch automatisierten Fahrens.

Zentral für die Ausgestaltung und Regelung der Mensch/Maschine-Schnittstelle sind die Übergabeverfahren in beiden Richtungen, ergänzt um die Herausforderung an die Technik, ständig analysieren zu müssen, ob sich aus Zustand der Technik oder externen Bedingungen heraus eine Notwendigkeit zur Übergabe ergeben kann.

Das technische System muss in Situationen, in denen es Anzeichen gibt, dass die Sicherheit nicht mehr gewährleistet werden kann, an den menschlichen Fahrer übergeben. Dies ist als Gebot der Realisierung von Sicherheit eine ethische und rechtliche Notwendigkeit. In Bezug auf die Ursachen für solche Übergabenotwendigkeiten sind zwei Fälle zu unterscheiden

- (a) *Überforderung der Technik*: Annäherung an die Leistungsgrenzen des technischen Systems, z.B. bei extremen Sichtverhältnissen, wenn Sensoren überfordert werden, oder bei extremen Straßenverhältnissen
- (b) *Technikversagen*: Sobald technische Probleme mit einzelnen Komponenten oder auf Systemebene auftreten, muss das System kontrolliert an den Menschen übergeben

Das System muss im Fall (a) zu jedem Zeitpunkt wissen, ob es den jeweiligen Anforderungen gewachsen ist. Es muss sich selbst beobachten, sich in Bezug zu relevanten Parametern der Umgebung setzen (z.B. Sichtverhältnisse) und daraus Konsequenzen ziehen, ob es

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

sich seiner Leistungsgrenzen oder einer Überforderung nähert. Angesichts der Vielfalt möglicher Grenzen der Leistungsfähigkeit dürfte die Realisierung dieser Anforderung eine erhebliche technische Herausforderung darstellen. Im Fall (b) muss das System selbst erkennen, dass bestimmte Komponenten versagen und muss trotz des Versagens (z.B. Computerabsturz) noch Zeit haben, in den „sicheren Zustand" für eine Übergabe an den Menschen überzugehen. In beiden Fällen muss die Übertragung von Kontrolle lückenlos dokumentiert werden.

Falls eine *sofortige* Übernahme der Kontrolle durch den Menschen im Falle eines Alarms des Systems notwendig wäre, müsste der Fahrer stets in voller Aufmerksamkeit sein. Dann würde die Hochautomatisierung jedoch keinen Nutzen stiften, den Fahrer nicht entlasten und nicht auf Akzeptanz stoßen. Daher müssen für die Übergabe Zeitreserven vorgesehen werden. Vielfach wird die Zahl von 10 Sekunden als Übergabezeit genannt. In einem solchen Fall muss das technische System sich und die Umgebung so gut kennen, dass eine Übergabenotwendigkeit in kürzerer Zeit (sozusagen ein „Notstand") technisch praktisch ausgeschlossen werden kann. In einem „Notstand" muss das System selbstständig in der Lage sein, das Fahrzeug in einen „sicheren Zustand" zu überführen, also z.B. kontrolliert auf einem Seitenstreifen zum Stillstand bringen. Dies dürfte eine ganz erhebliche Anforderung an die technischen Systeme sein.

Auch im Fall einer Zeitreserve von einigen Sekunden (höchstens 10) ist der Fahrer nicht von Verantwortung freigestellt. Er darf nicht so abwesend sein, dass er in dieser Zeit nicht zur vollen Kontrolle zurückkehren könnte. Er muss in der Lage sein, Meldungen des Systems aufzunehmen, dass die Übergabe in Kürze erfolgen wird. Diese Meldungen müssten, um sicher zu gehen, auf mehreren Kanälen erfolgen (optisch, akustisch, vielleicht auch haptisch) und könnten in einer stufenweise ansteigenden Warnkaskade bis hin zum Alarm bestehen. Insbesondere muss der Fahrer über den *bestimmungsmäßigen Gebrauch* der realisierten Automatisierung und dessen Grenzen informiert sein. Ein Überschreiten dieser Grenzen würde zulasten des Fahrers gehen (vgl. Tesla-Unfall). Andererseits darf das System bzw. der Anbieter oder Hersteller nicht eine größere Leistungsfähigkeit vortäuschen als realisiert ist.

Der Fahrer muss also in einem hoch automatisierten Fahrzeug die Verkehrssituation und das System nicht dauerhaft überwachen, sondern kann die Überwachung an das System abgeben. Zu jedem Zeitpunkt muss geklärt sein, welche Funktionen der Mensch und welche die Technik übernimmt und wie die Übergabesituationen geregelt sind. Dies ist auch jeweils zu dokumentieren, sowohl für eventuelle Unfälle als auch zum Zweck des Lernens.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4. Ethische Dilemmasituationen und ein Ausweg

In der Berichterstattung im Fernsehen, in den Kommentaren in Zeitungen und in Internetbeiträgen werden sehr häufig Extremsituationen diskutiert, aussichtslose Situationen unvermeidlicher Unfälle, in denen nichts Gutes mehr getan werden kann und höchstens noch nach dem kleinsten Übel gesucht werden kann. Klassiker sind Situationen, wo ein selbst fahrendes Auto nur die Wahl habe, zwei Kinder oder drei ältere Leute umzufahren, einen Obdachlosen mit 70% Wahrscheinlichkeit der Todesfolge oder einen gesellschaftlichen Leistungsträger mit 30% Wahrscheinlichkeit, oder sich entscheiden müsse, entweder die Insassen zu gefährden, vielleicht zu opfern, oder für andere einen katastrophalen Schaden zu erzeugen. Ein selbst fahrendes Auto müsste in der Tat im Falle des Falles diese Entscheidungen selbst treffen – und hier wird schnell von einem Skandal geredet: darf Technik über Leben und Tod entscheiden und wie müsste die geschehen? Statt vorschneller Empörung, dass technische Systeme auf möglicherweise undurchschaubare Weise über Tod und Leben entscheiden könnten, sind jedoch zunächst zwei Aspekte zu bedenken (dieser Abschnitt folgt Decker/Grunwald 2017).

(1) Wenn auch vielfach gesagt wird, dass wir im Fall selbst fahrender Autos die Verantwortung für Leben und Tod an die Technik abgeben, so stimmt das so eindeutig nicht. Denn die Technik entscheidet nicht von sich aus. Sie ist selbst menschgemacht und entscheidet nach menschlich vorgegebenen Kriterien. Programmierer, Manager, Regulatoren, Politiker, Verbände, Nutzer, sie alle wären einzubinden in Beratungs- und Entscheidungsprozesse, auf welche Weise mit den ethischen Herausforderungen umgegangen werden soll. Die Entscheidung über Leben und Tod bleibt indirekt durchaus beim Menschen – allerdings vermittelt über technische Systeme und nicht mehr beim einzelnen Autofahrer.

(2) Die ethischen Extremsituationen, die immer wieder bemüht werden, sind nicht relevant. Statistische Aussagen, wie oft sie vorkommen, gibt es nicht. Auf jeden Fall aber dürfte im jetzigen Straßenverkehr die Zahl der Opfer aus ethischen Extremsituationen verschwindend klein gegenüber den Opfer- und Unfallzahlen im „Normalbetrieb“ des Straßenverkehrs sein. Daher wirkt die Aufregung um die ethischen Extremsituationen künstlich und lenkt vom eigentlichen Problem nur ab.

Dennoch muss für Extremsituationen bei selbst fahrenden Autos vorgesorgt werden, ethisch verantwortlich und rechtlich abgesichert. Für eine Lösung dieser Fälle hilft ein Blick auf den heutigen menschlichen Fahrer. Auf ethische Extremsituationen wird er weder in der Fahr-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

schule vorbereitet noch kann er durch Fahrpraxis hierfür Kompetenz erwerben. Vermutlich macht ein Autofahrer in ausweglos erscheinenden Situationen einfach irgendetwas, Vollbremsung und Lenkrad verreißen, vor allem aber Augen zu. Für ausweglose Situationen, die dann auch noch extrem rasches Handeln erfordern würden, sind Menschen nicht gemacht. Hier können weder Routinen ausgebildet werden noch ist sorgfältiges Nachdenken möglich. Rechtlich wird der betroffene Autofahrer in einem solchen Fall nicht belangt, auch wenn ein erheblicher Schaden bis hin zur Todesfolge eingetreten ist, weil das Verhalten in solchen Extremsituationen nicht als absichtliches Handeln gilt. In Affektsituationen kann man nicht von Schuld und Verantwortung sprechen. Dies ist ein geeignetes Vorbild für die Gestaltung selbstfahrender Autos. Wenn man beim menschlichen Vorbild nicht von Handlung spricht, also in Extremsituationen, wäre auch der Bordcomputer von Verantwortung entlastet. Wie für Menschen heute würde anerkannt, dass diese Situationen nicht rational beherrschbar sind. Der Bordcomputer dürfte, metaphorisch gesprochen, als eine Art Zufallsgenerator arbeiten und dann „irgendwie“ entscheiden, wie der menschliche Autofahrer. Im Ergebnis wäre das nicht schlechter als es Menschen heute machen – der Skandalvorwurf würde ins Leere laufen.

Entscheidungen in ethischen Extremsituationen dem Zufall zu überlassen, klingt nun nicht gerade nach Vernunft und Verantwortung. Dem ist allerdings zweierlei entgegenzuhalten. Zum einen entspricht das dem bisherigen Umgang mit Extremsituationen (s.o.). Wenn das autonome Fahren im Normalbetrieb Abhilfe schafft und die Zahl der Verkehrsunfälle und –toten deutlich reduzieren hilft, wie dies viele erwarten, und in Extremsituationen zumindest nicht schlechter ist, dann ist die ethische Gesamtbilanz recht eindeutig. Zum anderen nehmen wir mit diesem Vorschlag eine Position der Bescheidenheit ein: wir erkennen an, dass es – wenigstens heute und in absehbarer Zeit – nicht möglich sein wird, diese Extremsituationen komplett und befriedigend aufzulösen. Wir erkennen an, dass sie prinzipiell nicht vermeidbar sind, und wir akzeptieren, dass auf diesem Weg Opfer zu beklagen sind und sein werden, wenn auch wenige im Vergleich zum Normalbetrieb. Das Element des Tragischen lässt sich technisch nicht komplett aus der Welt schaffen.

Freilich ist die Grenze zwischen verantwortungspflichtiger Handlung und zufallsgesteuertem und darum gerade von Verantwortung entlastetem Verhalten schwer zu bestimmen und wird sich mit dem technischen Fortschritt verschieben. Mit den Technologien autonomen Fahrens wird uns durch Technik ein bisher nicht zugänglicher Handlungsspielraum zugänglich gemacht. Bisher waren die Zehntelsekunden vor einem unvermeidbaren Unfall schlicht nicht zugänglich und konnten gar nicht anders als im Modus eines zufallsabhängigen Verhaltens

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

behandelt werden. Je stärker sich das ändert, wandern immer mehr der Extremsituationen aus dem Bereich des „Zufallsgenerators“ in den Bereich gestaltbaren und verantwortungspflichtigen Handelns. Graduelle Unterschiede lassen sich auf diese Weise immer weiter differenzieren und ethisch besser behandeln. Bereits wenn ein autonomes Fahrzeug zwischen zwei Unfallausgängen wählen könnte, bei dem der eine mit einem Personenschaden, der andere dagegen lediglich mit einem Sachschaden verbunden wäre, wäre etwas gewonnen im Vergleich zum menschlichen Fahrer heute.

5. Perspektiven der Akzeptanz: lernende Markteinführung

Die gesellschaftliche Risikowahrnehmung wird stark davon abhängen, wie das autonome Fahren eingeführt wird. Wenn dies auf dem Wege einer allmählichen Automatisierung des Fahrens erfolgt, besteht durch die Möglichkeit eines allmählichen Lernens aus den jeweils bisher gemachten Erfahrungen ein nur geringes Risiko einer ‚Skandalisierung‘ des autonomen Fahrens als Hochrisikotechnologie für Insassen oder externe Betroffene. Schritte auf dem Weg zur weiteren Automatisierung wie Traffic Jam Assist, Automated Valet Parking oder Automated Highway Cruising, deren Einführung in den nächsten Jahren erwartbar erscheint, würden vermutlich kaum eine erhöhte Risikobeobachtung erzeugen, weil sie auf dem inkrementellen Weg des technischen Fortschritts als quasi natürliche Weiterentwicklungen erscheinen.

Anders z.B. als beim Einschalten eines Kernreaktors verläuft der Prozess der zunehmenden Fahrerassistenz in Richtung auf mehr Automatisierung des Fahrens bislang allmählich. Das Automatikgetriebe ist bereits einige Jahrzehnte alt, mit ASB, ESP und Einparkhilfen sind wir vertraut, und weitere Schritte auf dem Weg zu einem immer stärker assistierten Fahren sind in der Entwicklung. Eine inkrementelle Einführung erlaubt ein Maximalmaß des Lernens und würde auch die allmähliche Adaptation etwa des Arbeitsmarktes oder der Anforderungen an Privatheit (s.o.) erlauben.

In eher revolutionären Einführungsszenarien würden sich andere und wohl auch größere Herausforderungen an die prospektive Analyse und die Wahrnehmung von Risiken stellen. Die öffentliche Wahrnehmung würde dann besonders sensibel auf Unfälle oder kritische Situationen reagieren, die Gefahr einer ‚Skandalisierung‘ wäre größer, und die Risikokonstellation ‚Investitionen‘ (s.o.) könnte sich für einzelne Zulieferer oder Marken zu einem realen Problem entwickeln.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Rede von der Technikfeindlichkeit der Deutschen ist allerdings eine Legende, die sich nur an den Erfahrungen mit Kernenergie und Gentechnik festmacht (acatech 2011). Alle empirischen Untersuchungen zeigen, dass ansonsten in einem großen Spektrum der Technik (digitale Techniken, Unterhaltungselektronik, neue Technologien im Automobilbereich, neue Materialien etc.) die Akzeptanz sehr groß ist. Dies gilt auch für einige Technologien, zu denen es durchaus intensive Risikodebatten gab oder gibt, wie z.B. Mobilfunk. Dass bei neuen Technologien heutzutage sofort Fragen nach Risiken gestellt werden, ist noch lange keine Technikfeindlichkeit, sondern Ausdruck der Erfahrung mit der Ambivalenz von Technik und des Wunsches nach möglichst umfassender Information. Vieles, was üblicherweise als Indiz für Technikfeindlichkeit genommen wird, hat mit der Technik wenig zu tun. Bei Stuttgart21 handelt es sich nicht um eine Ablehnung der Eisenbahntechnik, bei Protesten gegen neue Start- und Landebahnen an Großflughäfen nicht um eine Ablehnung der Technologie des Fliegens, oder beim Protest gegen Autobahnen und Umgehungsstraßen nicht um eine Ablehnung der Technologie des Autofahrens. Sogar bei Gentechnik und Kernenergie hat die Ablehnung auch stark mit nicht-technischen Faktoren zu tun: Misstrauen in internationale Großkonzerne wie Monsanto oder Misstrauen in eine funktionierende Kontrolle und Überwachung.

Das autonome Fahren wird eine lebensweltnahe Technologie sein, die mit dem Leben von Menschen so eng verbunden ist wie das heutige Autofahren. Das rückt es weit weg von der Kernenergie, während es die Lebensweltnähe gemeinsam mit der Grünen Gentechnik (über deren Einsatz in der Lebensmittelerzeugung) und dem Mobilfunk hat. Aus beiden Risikodebatten kann entnommen werden, wie zentral die Dimension des individuellen Nutzens ist. Während ein solcher vom Verzehr gentechnisch veränderter Nahrungsmittel sogar von den Befürwortern kaum erwartet wurde, ist der individuelle Vorteil des mobilen Telefonierens und des mobilen Internetzugangs evident. Und sobald dieser Nutzen erkennbar groß ist, sind Menschen auch bereit, mögliche Risiken einzugehen. Das ist handlungstheoretisch absolut rational. Irrational ist es dagegen, Risiken auf sich zu nehmen, wenn der Nutzen nicht erkennbar ist oder nur anderen Akteuren (Beispiel Monsanto für die Grüne Gentechnik) zukommen würde.

So gesehen ist es Aufgabe von Technikfolgenabschätzung (Grunwald 2010) und Ethik, einen Weg zu skizzieren, das autonome Fahren verantwortlich und Schritt für Schritt in die bisherige Mobilität zu integrieren. Die Orientierung am Status Quo des heutigen Autofahrers – selbst fahrende Autos müssen im Normalbetrieb unter Sicherheitsaspekten besser und dürfen in Extremsituationen nicht schlechter sein – ist dabei der Anfang. Des Weiteren ist dann

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

die Aufgabe, dass auch in Extremsituationen der technische Fortschritt in ethische Gewinne umgesetzt werden kann.

Literatur

acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2011): Akzeptanz von Technik und Infrastrukturen. acatech Position Nr. 9, Berlin 2011. Abrufbar unter: www.acatech.de/de/publikationen/publikationssuche/detail/artikel/akzeptanz-von-technik-und-infrastrukturen.html (Zugriff 29.7.2014)

Decker, M., Grunwald, A. (2017): Ethische Dilemmasituationen und ein Ausweg (bislang unveröffentlicht)

Grunwald, A. (2005): Zur Rolle von Akzeptanz und Akzeptabilität von Technik bei der Bewältigung von Technikkonflikten“. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis **14**(3), 54-60 (2005)

Grunwald, A. (2010): Technikfolgenabschätzung - eine Einführung. Ed. Sigma, Berlin, 2. Aufl (2010)

Grunwald, A. (2015): Gesellschaftliche Risikokonstellation für Autonomes Fahren. Analyse, Einordnung und Bewertung. Autonomes Fahren. In: Maurer, M., Gerdes, J.C., Lenz, B., Winner, H. (Hrsg.) Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Springer, Heidelberg,661 - 685

Maurer, M., Gerdes, J.C., Lenz, B., Winner, H. (2015, Hg.) Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Springer, Heidelberg

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Kennfeldbasierte Leerlaufregelung einer Verbrennungskraftmaschine

Characteristic map based idle speed control of a spark ignition engine

M.Sc. **Tim Daszenies**, Dr.-Ing. **Tim Könings**,
Prof. Dr.-Ing. **Steven X. Ding**, Universität Duisburg-Essen, Duisburg;
Dr.-Ing. **Frank Wobbe**, Dr.-Ing. **Jan Klöck**, Dr.-Ing. **Nick Weinhold**,
Matthias Schultalbers, IAV GmbH, Gifhorn

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird eine neue Methode für eine Off-Line Kennfeldbedatung, mit Anwendung im Bereich der Leerlaufregelung einer Verbrennungskraftmaschine (VKM) vorgestellt. Die neue Bedatungsstrategie basiert auf einem Luftpfad Modell (vgl. [1]), welches durch eine Übertragungsfunktion niedriger Ordnung darstellbar ist. Die betrachteten Kennfelder werden für die Verwendung in einer Optimierungsroutine passend aufbereitet und die lokal optimalen Stützstellenwerte ermittelt. Eine der größten Herausforderungen dabei ist die Reduktion des Lösungsraums der Stützstellenwerte, unter Berücksichtigung von Stabilitäts- und Performance-Anforderungen. Die Grundidee besteht darin den Parameterraum für die Optimierung mittels linearer *PI-Regler* aufzuspannen. Die eigentliche Optimierung wird anschließend mit einem Algorithmus aus dem Bereich des maschinellen Lernens durchgeführt, dem CARLA (*continuous action reinforcement learning automata*)-Algorithmus (vgl. [2]). Abschließend wird die neue Bedatungsstrategie, auf Basis realer Messdaten, mit existierenden Verfahren verglichen.

Abstract (optional)

In this contribution a novel off-line parametrization method of a characteristic map based idle speed control strategy for a spark ignition engine is proposed. The new strategy uses a low order system air-path model of a spark ignition engine (see [1]), which represents the dominating dynamics. The characteristic map is described in an adequate way for the use of an optimization routine to find the locally optimal parameters corresponding to the grid points of the characteristic map. One of the major challenges is the reduction of complexity by still achieving performance benefits and maintaining stability. This will be done by using linear PI

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

controllers spanning the search area. The optimization is carried out with *continuous action reinforcement learning automata* (CARLA, [2]), a machine learning algorithm, modified for selecting actions in a continuous space and minimizing the well-known IAE cost functional. The resulting off-line design will be tested against existing idle speed controller realizations and the usefulness of this new strategy will be demonstrated.

1. Einführung

Zur Koordination verschiedenster Funktionalitäten, welche das Drehmoment eines Kraftfahrzeugantriebsstranges beeinflussen, werden seit Mitte der 1990er Jahre drehmomentbasierte Softwarefunktionsstrukturen im Rahmen des Motormanagements eingesetzt [3]. Diese Strukturen sorgen für eine passende Koordination der anfallenden Drehmomentanforderungen. Diese Anforderungen können prinzipiell in externe und interne Anforderungen unterteilt werden. Zu den internen Anforderungen zählt unter anderem die Leerlaufregelung, welche in dieser Arbeit betrachtet wird.

Moderne Motormanagement Systeme sorgen dafür, dass eine konstante Drehzahl unter verschiedenen Lastanforderungen, wie beispielsweise durch Einschalten der Lichtmaschine oder Betätigen der elektrischen Fensterheber, eingehalten wird. Verbrennungskraftmaschinen sind stark nichtlineare Systeme, die zudem mit variablen Totzeiten und Diskontinuitäten behaftet sind. Daher ist eine exakte Modellierung oft mit erheblichem Aufwand verbunden. Gleiches gilt für die geeignete Auswahl einer Regelungsstrategie mit entsprechender Parametrierung. Aus diesem Grund eignet sich dieses Anwendungsbeispiel in besonderem Maße für Anwendung von Optimierungsstrategien basierend auf Lernalgorithmen. Ein Modell auf Basis einer kontinuierlich arbeitenden Drehmomentquelle, welches für Regelungstechnische Zwecke aufbereitet wurde, findet sich beispielsweise in [1].

In diesem Beitrag wird zur Regelung der Leerlaufdrehzahl der trägere Luftpfad betrachtet. Dabei wird angenommen, dass der betrachtete Ottomotor stets bei optimalem Zündwinkel betrieben wird. Dementsprechend ist die sonst zur Sicherstellung einer geforderten Regelgüte verwendete Momentenreserve so weit wie möglich reduziert und die *VKM* hinsichtlich des Verbrauchs optimiert, siehe [1] für eine Darstellung der Stellgrößen, Momente und Wirkzusammenhänge im Ottomotor.

2. Regelkreis und Problemformulierung

Ausgangspunkt für die modellbasierte Off-line Optimierung einer kennfeldbasierten Regelung bildet in diesem Beitrag ein Regelkreis nach Bild 1. Hier beschreiben $G_p(s)$ und $G_c(s)$ jeweils das Prozessmodell und den Regler. Weiterhin beschreiben $y_s(s)$ den extern vorgegebenen

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Sollwert, *e(s)* den Regelfehler, *u(s)* die Stellgröße und *y(s)* den Streckenausgang. Eingangs- und Ausgangsstörung sind mit $d_u(s)$ bzw. $d_y(s)$ gekennzeichnet.

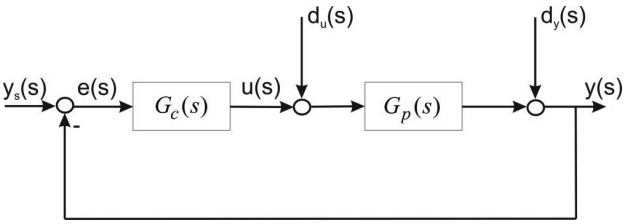


Bild 1: Standardregelkreis

2.1 Prozessmodell

In dieser Arbeit wird die Dynamik des Luftpfades einer VKM stark vereinfacht als IL_1-System angenommen:

$$G_P(s) = \frac{1}{T_i} \cdot \frac{1}{s} e^{-T_t}, \tag{1}$$

mit den nominellen Systemparametern T_i, als Integratorzeitkonstante und T_t als Totzeit des Systems. Die entsprechenden Werte entstammen der physikalischen Modellierung basierend auf [1] und sind durch Messungen am Kraftfahrzeug validiert worden.

2.2 Proportional-Integral (PI-Regler)

Zur Regelung von *IL_1-Systemen* ist die Verwendung von Standard-*PI-Reglern* üblich, deren Ausgang wie folgt repräsentiert werden kann:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\, d\tau, \text{mit } K_i = \frac{K_p}{T_i} \tag{2}$$

Hier beschreibt K_p den proportionalen Verstärkungsfaktor und T_i die Integrationszeitkonstante.

2.3 Kennfeldbasierte PI-Regelung

Ein Kennfeld ist als Erweiterung des Begriffs Kennlinie bzw. Kennwert zu verstehen. Diese beschreiben einen funktionalen Zusammenhang mittels wenigstens zwei Eingangsgrößen.

Ein Kennfeld wird im Folgenden als *Rasterkennfeld* interpretiert (eine formelle Definition wird bspw. in [4] angegeben). Unter diesem Begriff wird ein Kennfeld verstanden, dessen Grundbereiche $X_1, \dots, X_n$ jeweils passend in *m* Werte diskretisiert werden. In Anlehnung an [4] können die Stützstellen eines Kennfeldes als Tupel dargestellt werden, $S = (p_S, p_w) = \big((x_1, \dots, x_n), f((x_1, \dots, x_n))\big)$, p_s und p_w bezeichnen jeweils Stützstellenposition und Stützstel-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

lenwert. Beschreibt $S_{x_i} = \{s_1, \dots, s_{m_i}\} \subset X_1, m_i \in \mathbb{N}, i = 1, \dots, n$ die Menge aller Stützstellen zu einem Grundbereich X_i, so gilt für die Menge aller Stützstellen eines Kennfeldes *K*: $|M_K| = m_1 \cdot \dots \cdot m_n$, [4].

Die zentralen Aufgaben liegen nun in der passenden Wahl der Stützstellenpositionen p_w, sowie der Stützstellenwerte p_s, wobei ersteres für diese Arbeit als gegeben angenommen wird.

Zur Auslegung einer kennfeldbasierten PI-Regelung wird die Stellgröße *u*, entsprechend Gl. (3) und (4) in die beiden Stellanteile $u_p(e,r,t)$ und $\frac{d}{dt}u_i(e,r,t)$ unterteilt.

$$u_p(e,r,t) = K_p(e,r) \cdot e(t) \tag{3}$$

$$\frac{d}{dt}u_i(e,r,t) = K_i(e,r) \cdot e(t), mit\ r = \frac{dy(t)}{dt} \tag{4}$$

$$u_{ges} = u_p(e,r,t) + \int_0^t \frac{d}{dt}u_i(e,r,t)d\tau = K_p(e,r) \cdot e(t) + \int_0^t K_i(e,r) \cdot e(\tau)d\tau \tag{5}$$

Die Stellanteile $u_p(e,r,t)$ und $\frac{d}{dt}u_i(e,r,t)$ werden in der Praxis ausgehend von einfachen PI-Reglerstrukturen um nichtlineare Bedatungsstrategien ergänzt. Eingesetzt in die PI-Struktur der Regelung ergibt sich die Stellgröße wie in Gl. (5) dargestellt. Als Eingangsgrößen der Kennfelder werden der Regelfehler *e*, sowie die Ableitung der Ausgangsgröße *r* festgelegt, deren Grundbereiche entsprechend abgeschätzt wurden, vgl. Bild 2.

Eine Stützstelle wird beispielhaft, entsprechend obiger Ausführungen, angegeben als $S = (p_s, p_w) = \big((r_1, e_1), u(e_1, r_1, t)\big)$.

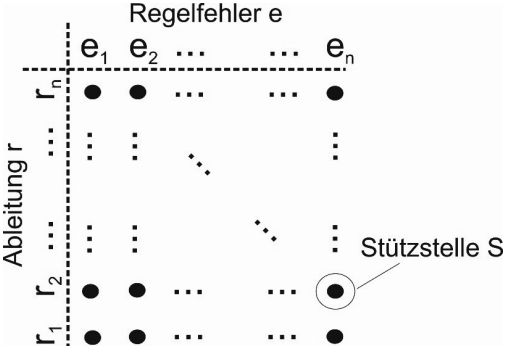


Bild 2: Beispielhaftes Kennfeld mit den Eingangsgrößen e,r in Matrixdarstellung

Diese Vorgehensweise erfordert einen hohen Applikationsaufwand und ein hohes Maß an Erfahrung, da nach bisherigem Stand kaum geeignete systematische Entwurfsmethoden zur

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Verfügung stehen, um nichtlineare Kennfeldregler an linearisierten Strecken analytisch zu parametrieren. Eine Übersicht über Kennfelder in der Regelungstechnik bietet beispielsweise [5].

2.4 Performanz-Anforderungen

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf einer bestmöglichen Ausregelung von Eingangsstörungen, sodass die Reglerperformanz mittels des bekannten IAE-Kriteriums (siehe bspw. [6]) charakterisiert wird:

$$J_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt, \tag{6}$$

wobei *e(t)* den Regelfehler unter Einwirkung einer Sprungförmigen Last beschreibt. Durch die Quantifizierung der Ausgangsperformanz durch einen einzigen skalaren Wert, welcher durch die Messreihen der entsprechend beteiligten Signale gebildet wird, ist eine Anwendung auch bei nichtlinearen Regelkreisen zulässig.

Weiterhin soll in dieser Arbeit die Robustheit des Regelkreises betrachtet werden, welche für *SISO*- (Single Input Single Output) Systeme als Maximalwert M_s der Empfindlichkeitsfunktion darstellbar ist:

$$M_s = \max_{\omega \in [0,+\infty)} \left| \frac{1}{1 + G_c(s;\theta_c) G_p(s)} \right|_{s=j\omega}. \tag{7}$$

Hierbei beschreibt $\theta_c = [K_p \quad K_i]$ die als Vektor zusammengefassten Reglerparamter [6]. Die explizite Berücksichtigung der Stellgrößennutzung erfolgt an dieser Stelle nicht, da diese mit der Robustheit korrespondiert, [7].

Sämtliche vorab beschriebenen Voraussetzungen können als Zielsetzung für eine multikriterielle Optimierung aufgefasst werden, wobei die Robustheit aus Gl. (7) als Gleichungsnebenbedingung behandelt wird. Die multikriterielle Optimierung findet Anwendung bei der Parametrierung linearer PI-Regler, welche die Basis für die in späteren Abschnitten beschriebene Kennfeld-Parametrierung bilden.

Zum Vergleich einer linearen- mit einer nichtlinearen-Regelstrategie unter dem Aspekt der Robustheit, wird in dieser Arbeit ein Signalbasierter Robustheitswert R_i verwendet. Dieser beschreibt den maximalen Ausschlag eines Signals über alle Frequenzen, zu dessen Generierung ein „Chirp-Signal“ verwendet wird.

3. Multikriterielle Optimierung

Ein multikriterielles Optimierungsproblem mit Nebenbedingungen kann formal angegeben werden als:

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$\min_{\theta \in \mathbb{R}^n} J(\theta) = [J_1(\theta), \dots, J_m(\theta)] \in \mathbb{R}^m \tag{8}$$
$$s.t.\, g(\theta) \leq 0$$
$$h(\theta) = 0$$
$$\theta_{li} \leq \theta \leq \theta_{ui}$$

Hierbei beschreibt $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_n]$ den Vektor der Entscheidungsvariablen, $J(\theta)$ den Vektor der Zielfunktionen und $g(\theta)$ und $h(\theta)$ die Vektoren der Ungleichungs- und Gleichungsnebenbedingungen. Die Variablen θ_{li} und θ_{ui} beschreiben die Unter- und Obergrenze der Variablen θ_i im Entscheidungsraum. Ein multikriterielles Optimierungsproblem wird üblicherweise durch die simultane Optimierung aller Zielfunktionen behandelt. In dieser Arbeit werden in einem ersten Optimierungsschritt sogenannte „Pareto-optimale" Regler ausgelegt, welche eine *Pareto-Front* approximieren. Der Begriff *Pareto-Optimalität* findet Anwendung bei multikriteriellen Optimierungsproblemen und besagt, dass, im Falle von *m=2*, in Zielfunktion 1 keine weiteren Verbesserungen mehr erzielt werden können, ohne Zielfunktion 2 zu verschlechtern. Die Lösung dieser Problemklasse impliziert das Vorhandensein einer Menge von Lösungen, dessen Abbildung in den Zielfunktionsraum durch eine Pareto-Front beschrieben wird [7].

Zur Approximation einer Pareto-optimalen Kurve mittels PI-Reglern wird folgendes Optimierungsproblem angesetzt [7]:

$$\text{Löse für alle } M \in \mathcal{M}_s\text{:} \tag{9}$$
$$\min_{\theta_c} J(\theta_c) = 0.5 \left(\frac{1}{\varphi_{dy}} J_{IAE,dy}(\theta_c) + \frac{1}{\varphi_{du}} J_{IAE,du}(\theta_c) \right)$$
$$s.t.\, h(\theta_c) - M = 0,$$

mit $h(\theta_c) = M_s$ und einer gegebenen Menge von Robustheitswerten $\mathcal{M}_s = \{1.1, \dots, 1.59, \dots, 2.95\}$. Die Gewichte φ_{dy} und φ_{du} werden durch die optimalen *IAE* Werte von Referenz PI-Reglern definiert, welche jeweils nur auf die Unterdrückung von Ausgangs- oder Eingangsstörungen parametriert wurden. Tabelle 1 zeigt die Referenzwerte, sowie die Parameter der Optimierten PI-Regler für die IL_1-Strecke aus Gl. (1) Die nachstehenden Werte wurden durch Lösung des Optimierungsproblems aus Gl. (9), ohne Nebenbedingungen, mittels eines Gradientenverfahrens unter Nutzung exakter Gradienten generiert, vgl. [7].

Tabelle 1: Referenzregler für Sollwertänderung und Eingangsstörung

Sollwertänderung (1 U/min)		Eingangsstörung (1/Nm)	
K_p = 0.49 K_i = 4.34e^{-04}	φ_{dy}= 5.02	K_p = 0.75 K_i = 1.12	φ_{du}=0.34

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die *IAE-Kriterien* $J_{IAE,dy}(\theta_c)$ und $J_{IAE,du}(\theta_c)$ beschreiben die beiden Zielfunktionen, jeweils bezogen auf den Regelfehler *e(t)* des Systems, unter Einwirkung einer Eingangs- bzw. Ausgangsstörung, vgl. Gl. (9). Bild 3 zeigt die Approximation der Pareto-Front, welche den Kompromiss zwischen Performance und Robustheit darstellt.

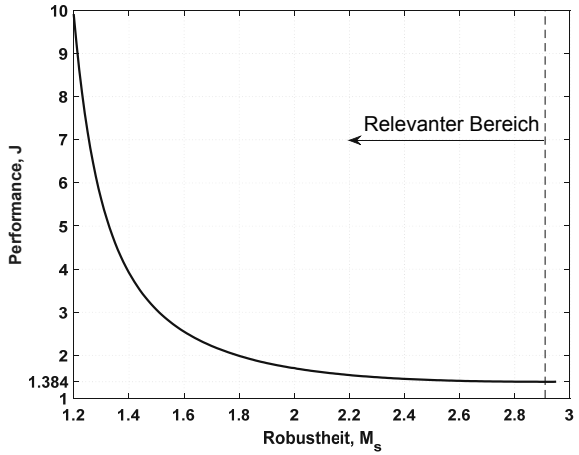


Bild 3: Generierte Pareto-Front unter Kennzeichnung des relevanten Bereichs

4. Neue Bedatungsstrategie

Die in dieser Arbeit entwickelte Bedatungsstrategie umfasst im Wesentlichen die Punkte Lösungsraumreduktion und Lernen passender Stützwerte, unter Anwendung geeigneter Testszenarien. Für die beiden Kennfelder,$u_p(e,r,t)$ und $\frac{d}{dt}u_i(e,r,t)$ wird passend zu dem im vorigen Abschnitt beschriebenen System folgende Diskretisierung der Grundbereiche angenommen:

$$X_{p,e}, X_{p,r}, X_{i,e} X_{i,r} \in \mathbb{R}^{1\times 10}. \tag{10}$$

Hierbei können die Grundbereiche von P- Anteil $X_{p,e}, X_{p,r}$ und I-Anteil$X_{i,e} X_{i,r}$, unterschiedliche Stützstellenpositionen aufweisen.

Damit ergibt sich die Gesamtzahl an Stützstellen M_K des jeweiligen Kennfeldes zu $M_{K,p} = M_{K,i} = 100$, was in einer Gesamtzahl von $M_{K,ges} = M_{K,p} + M_{K,i} = 200$ Stützstellen resultiert. Zwecks einer Lösungsraumreduktion kann man sich die Tatsache zunutze machen, dass beide Kennfelder nach Gl. (5) durch eine PI Struktur verbunden sind. Daraus resultiert die Idee ein übergeordnetes Kennfeld M_{Kenn} zu definieren, welches gleichzeitig die Kennfelder

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$u_p(e,r,t)$ und $\frac{d}{dt}u_i(e,r,t)$ bestimmt. Daraus ergibt sich zudem die Verwendung eines linearen PI-Reglers in jedem Arbeitspunkt des Kennfeldes. Dieses übergeordnete Kennfeld wird hier durch die im vorherigen Abschnitt verwendeten Robustheitswerte bestimmt, denen mittels der Approximierten Pareto-Front entsprechend *Pareto-optimale* Reglerparameter zugeordnet werden können. Algorithmus 1 fasst die oben beschriebene Vorgehensweise zusammen.

Algorithmus 1: Neue Bedatungsstrategie

(1) **Löse für alle** $M \in \mathcal{M}_s$:

$$\min_{\theta_c} J(\theta_c) = 0.5\left(\frac{1}{\varphi_{dy}} J_{IAE,dy}(\theta_c) + \frac{1}{\varphi_{du}} J_{IAE,du}(\theta_c)\right)$$

subject to:

$$h(\theta_c) - M = 0$$

Ergebnis: $\left[K_p\ K_i\right] = \mathcal{F}(M), mit\ M \in \mathcal{M}_s$

(2) **Solange** Abbruchbedingung nicht erfüllt

$$\min_{\theta_{p_w} \in \mathbb{R}^{100}} J\left(\theta_{p_w}\right) = \frac{1}{\varphi_{du}} J_{IAE,du}\left(\theta_{p_w}\right)$$

$$s.t.\ \min(\mathcal{M}_s) \leq \theta_{p_w} \leq \max(\mathcal{M}_s)$$

Ende

Ergebnis: $\left[u_p(e,r,t)\ \frac{d}{dt}u_i(e,r,t)\right] = \mathcal{F}^*(M_{Kenn}),\ mit\ \theta_{p_w,i} \in \mathcal{M}_s, ; i = 1, \ldots, 100$

Hier beschreibt $\mathcal{F}$ eine Abbildung welche über die approximierte Pareto-Front, den Robustheitswerten entsprechende Parameter zuordnet und repräsentiert damit die Lösung des ersten Optimierungsproblems aus *Algorithmus 1*. Die Abbildung $\mathcal{F}^*$ ordnet den Kennfeldern für P- und I-Anteil die entsprechenden Werte aus dem übergeordneten Kennfeld M_{Kenn} zu, welche außerhalb der Rasterpunkte, durch ein geeignetes Interpolationsverfahren ermittelt werden. Der Vektor θ_{pw} beinhaltet die Stützstellenwerte aus M_{Kenn}, welche sich in der Menge $\mathcal{M}_s$ befinden. Aufgrund der hohen Anzahl an Stützstellen wird für das zweite Optimierungsproblem aus *Algorithmus 1* ein Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens angewandt, welches im Folgenden kurz erläutert wird.

5. CARLA-Algorithmus

Der CARLA (Continuous Action Reinforcement Learning Automata) Algorithmus wurde zum ersten Mal von [2] veröffentlicht. Der auf dem Prinzip der stochastischen Aktionswahl beru-

https://doi.org/10.51202/9783181022824 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

hende Lernalgorithmus ist als Erweiterung zu den sonst üblichen diskreten Lernautomaten zu sehen [2]. Die typische Arbeitsweise ist in Bild 4 dargestellt.

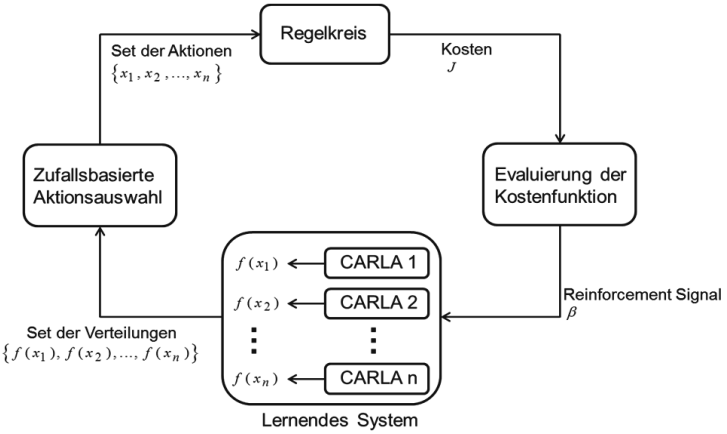


Bild 4: Architektur und Arbeitsweise des CARLA-Algorithmus [2]

Alle zu optimierenden Parameter eines Systems werden im sogenannten *lernenden System* verarbeitet. Dabei wird jedem Parameter ein Automat zugeordnet, welcher nach dem Prinzip des maschinellen Lernens bzw. CARLA Algorithmus arbeitet. Jeder Automat generiert im Laufe des Lernprozesses eine Wahrscheinlichkeitsverteilung $f(x)$, welche einen Einfluss auf die als nächstes gewählten Parameter hat. In Wechselwirkung stehen die einzelnen Automaten durch den entsprechenden Regelkreis. Parameterkombinationen die in einer Erhöhung der Systemperformanz resultieren, werden in ein „Reinforcement Signal“ β überführt, welches die Wahrscheinlichkeit zur erneuten Auswahl dieser Kombination erhöht. Zu diesem Zweck wird die zu Beginn des Lernvorgangs gleichverteilte Wahrscheinlichkeitsverteilung $f(x)$ durch eine Gaußfunktion aktualisiert, dessen Mittelpunkt sich bei der erfolgreichen Aktion befindet. Mit steigender Iterationszahl konvergiert das System zu einer einzigen Gaußfunktion [2]. Für eine ausführliche Darstellung und Hinweise zur Implementierung siehe beispielsweise [2]. Zur Lösung des Optimierungsproblems (2) in *Algorithmus 1*, werden die Aktionen x_i durch die Parameter θ_{pw} und die Güte J durch die entsprechend angeschriebene Güte $J(\theta_{p_w})$ ersetzt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

6. Ergebnisse

6.1 Modellbasiertes Lernen

Tabelle 2 zeigt die Iterationszahl und den Gütewert des gelernten nichtlinearen Reglers, sowie den Vergleichswert eines linearen Reglers mit gleichem signalbasiertem Robustheitswert. Zu erkennen ist der im Mittel niedrigere IAE-Wert der nichtlinearen Bedatungsstrategie.

Tabelle 2: Vergleich der nichtlinearen und linearen Bedatungsstrategie

Störung (Eingang / 1,4%-2% von M_{Max})		
Kriterium	Kennfeldregler	PI Regler
IAE	100% (Mittel)	117%
R_I	100%	100%
Iterationen	~13000	~10

6.2 Test im Fahrzeug

Bild 5 und Bild 6 zeigen die Ergebnisse einer Messung am Kraftfahrzeug für zwei Lastsprünge von 1,4% und 2% des maximal indizierten Motormoments M_{Max}. Verglichen wird jeweils die neue Bedatungsstrategie mit einer linearen, nichtlinearen und einer manuellen Kalibrierung. Zur Beurteilung der Ergebnisse sind, neben der Drehzahl, der proportionale- und integrale-Anteil der Stellgröße, bezogen auf M_{Max} dargestellt. Es zeigt sich durch eine qualitative Auswertung der dargestellten Verläufe die gute Performanz der neuen Bedatungsstrategie gegenüber den Vergleichskonzepten. Erkennbar ist der geringe Drehzahleinbruch in Verbindung mit einer sehr schwingungsarmen Ausregelung der Störung. Dies zeigt sich auch durch den relativ gleichförmigen Verlauf des Integralanteils der Stellgröße.

7. Fazit und Ausblick

Zum Abschluss kann festgehalten werden, dass die wesentlichen Anforderungen an eine Leerlaufregelung, Vermeidung eines starken Drehzahleinbruchs und Schwingungsfreier Verlauf, mit der dargestellten Optimierungsstrategie erfüllt werden konnten. Zudem konnte durch eine systematische Applikation der Leerlaufregelung die Momentenreserve reduziert und somit eine Verbrauchsoptimierung ermöglicht werden. In weiteren Arbeiten wird darauf aufbauend die On-line Bedatung entsprechender Kennfelder untersucht, wobei der Fokus auf einer weiteren Lösungsraumreduktion, sowie Effizienz-Verbesserung des gewählten Lernalgorithmus liegt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

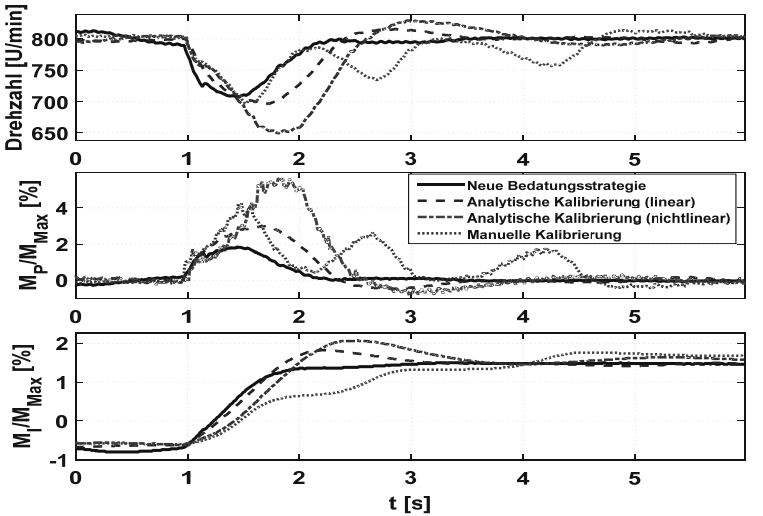


Bild 5: Vergleich der Bedatungsstrategien für einen Störsprung von 1,4% von M_{Max}

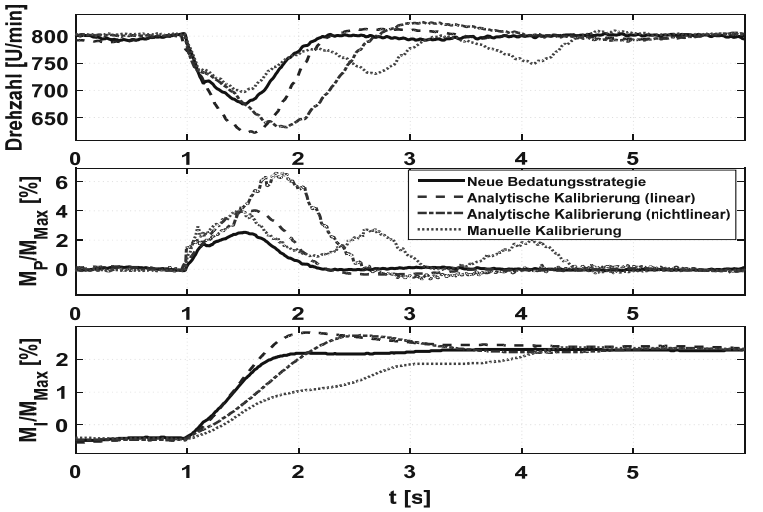


Bild 6: Vergleich der Bedatungsstrategien für einen Störsprung von 2% von M_{Max}

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

8. Literaturverzeichnis

[1] C. Kandler, *Methoden zur modellbasierten Mehrgrößenleerlaufregelung eines Hybridantriebsstrangs,* Universität Duisburg-Essen Diss., 2014.

[2] G. P. Frost, *Stochastic optimization of vehicle suspension control systems via learning automata,* Loughborough University Diss., 1998.

[3] W. Heß, „Drehmomentorientierte Struktur der Motorsteuerungen," in *Modellgestützte Steuerung, Regelung und Diagnose von Verbrennungsmotoren* , Heidelberg, Springer Berlin, 2003, pp. 11-21.

[4] M. Schröder, *Optimierung Kennfeldbasierender Reglerstrukturen mit Hilfe von verallgemeinerten Genetischen Algorithmen,* Technische Universität Braunschweig Diss., 1996.

[5] M. Heiss, „Kennfelder in der Regelungstechnik," *at - Automatisierungstechnik 43,* pp. 363-367, 1995.

[6] K. J. Astrom und T. Hägglund, Advanced PID control, Research Triangle Park, NC : ISA , 2006.

[7] C. Grimholt und S. Skogestad, „Optimal PI-Control and Verification of the SIMC Tuning Rule," *IFAC Conference on Advances in PID Control,* pp. 11-22, 2012.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Systematische modellbasierte Schwingungsanalyse einer geregelten elektrischen Servolenkung

Systematic model based vibration analysis of a controlled electric power steering system

B.Eng. **M. Haßenberg**, Prof. Dr.-Ing. **H. Henrichfreise**,
Labor für Mechatronik (CLM) TH Köln;
Prof. Dr.-Ing. **G. Wittler**, Hochschule Esslingen;
Dipl.-Ing. **H. Briese**, M.Sc. **T. Schubert**,
DMecS GmbH & Co. KG, Köln

Kurzfassung

In [1, 2] wurde ein LQG/LTR-Entwurf für die Regelung des Fahrerhandmomentes an elektromechanischen Servolenkungen (Electric Power Steering, EPS) vorgestellt. Auf Grund von beim Reglerentwurf nicht berücksichtigten Elastizitäten in der Lenkmechanik kommt es zu unerwünschten Schwingungen (parasitären Eigenbewegungen). In diesem Beitrag werden die Auswirkungen dieser parasitären Eigenbewegungen auf das Verhalten der Regelung gezeigt. Durch eine detailliierte Modellanalyse werden die Ursachen dieser Probleme verdeutlicht. Die Ergebnisse dieser Modellanalyse werden für einen neuen Regelungsansatz genutzt.

Abstract

In [1, 2] a LQG/LTR-design is presented to control the steering wheel hand torque of electric power steering systems. Undesirable oscillations (parasitic eigenmodes) are caused by elasticities, which are not considered in the controller design. This paper shows the impact of these parasitic eigenmodes on the behaviour of the control system. Based on a detailed model analysis the root causes are shown. The results of this model analysis are used for a new control approach.

1. Einleitung

Für die Regelung von elektromechanischen Lenksystemen werden unterschiedliche Regelungsalgorithmen eingesetzt. In [1, 2] wurde ein LQG/LTR-Entwurf für die Regelung des Fahrerhandmomentes an EPS-Lenksystemen vorgestellt. Ein Vorteil dieses Regelungsansatzes ist, dass die Einstellung des Lenkgefühls getrennt von dem Entwurf der Regelung durchge-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

führt wird. Vorrausetzung für die Applikation des Lenkgefühls ist eine robuste Regelung. Aus diesem Grund werden in diesem Beitrag die Robustheitseigenschaften der Regelung genauer betrachtet. Der bestehende Reglerentwurf berücksichtigt lediglich die Elastizität des Torsionsstabes. In einer elektromechanischen Servolenkung ist jedoch eine Vielzahl weiterer elastischer Lagerungen vorhanden. Diese dienen unter anderem der Geräuschminimierung, dem Ausgleich von Fertigungstoleranzen oder der Minderung von Stößen auf die Lenkmechanik. Da diese Elastizitäten im Reglerentwurf nicht berücksichtigt sind, können sie zu unerwünschten Schwingungen (parasitären Eigenbewegungen) und sogar zu Stabilitätsproblemen führen [3]. Im Rahmen dieses Beitrags wird mit Hilfe eines modellbasierten Ansatzes eine systematische Analyse dieser Schwingungsphänomene beschrieben. Dazu wird in Abschnitt 2 ein detailliertes Modell abgeleitet, das alle in einer Lenkmechanik auftretenden Elastizitäten beinhaltet. Um den Einfluss dieser Elastizitäten auf die Regelung zu untersuchen, wird in Abschnitt 3 die bestehende LQG/LTR-Regelung mit diesem detaillierten Modell analysiert. Die Ursachen der in Abschnitt 3 beschriebenen Probleme werden in Abschnitt 4 durch eine detaillierte Modellanalyse aufgezeigt. Schließlich wird in Abschnitt 5 eine erste Maßnahme zur Verbesserung der Regelung vorgestellt. Die Untersuchungen werden am Beispiel eines achsparallelen EPS durchgeführt. Die Methodik lässt sich grundsätzlich auch auf andere Bauformen übertragen.

2. Modellbildung der Lenkmechanik

Bild 1 zeigt das physikalische Ersatzmodell der Lenkmechanik mit acht Freiheitsgraden (8 DOF). Die einzelnen Körper sind dabei mit den Indizes S (steering), P (pinion), R (rack), N (nut), M (motor), C (casing), V (vehicle), WL (left wheel) und WR (right wheel) versehen. Die Elastizitäten im Modell werden durch die Torsionsstabsteifigkeit c_{tb} (Drehmomentsensor), Flankensteifigkeit des Kugelgewindetriebs c_{NR}, Riemensteifigkeit c_{MN}, Steifigkeit der axialen Mutterlagerung c_{NC}, Steifigkeit der Gehäuseaufhängung c_{CV} und die Steifigkeit der Radanbindung c_{RW} berücksichtigt. Die Trägheiten, bzw. Massen der Körper werden mit J_X, bzw. mit m_X bezeichnet, wobei der Index den entsprechenden Körper darstellt. Übersetzungsverhältnisse sind mit i_{XY} bezeichnet, wobei der erste Index für den antreibenden Körper und der zweite Index für den angetriebenen Körper steht. Für das dargestellte physikalische Ersatzmodell wurden die Bewegungsgleichungen hergeleitet, für die Analyse linearisiert und in Zustandsraumdarstellung überführt. Ausgehend von dem Modell mit acht Freiheitsgraden wurde durch eine physikalisch motivierte Modellreduktion ein weiteres Modell mit drei Freiheitsgraden (3 DOF) erzeugt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

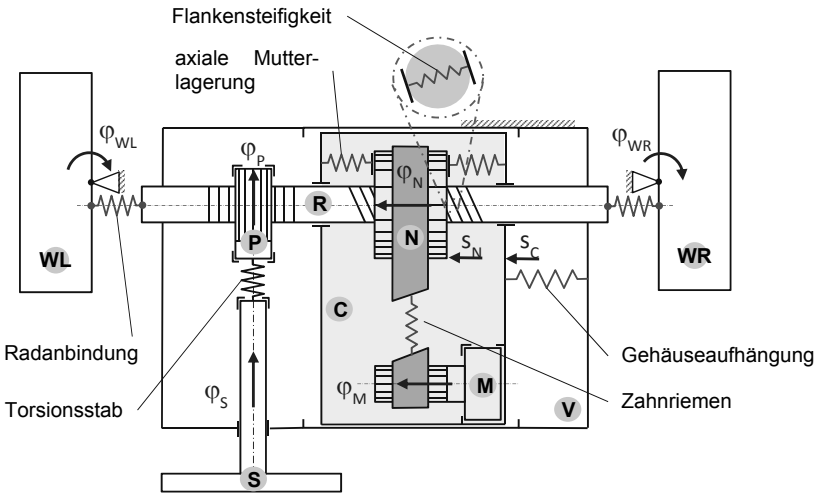


Bild 1: Physikalisches Ersatzmodell der Lenkmechanik mit acht Freiheitsgraden

Wird nur die Torsionsstabsteifigkeit berücksichtigt und werden die übrigen Verbindungen als starr angenommen, können die Trägheiten der Körper M, N, R, P, WL und WR zusammengefasst werden. Aus diesem Schritt resultiert das Modell mit zwei Freiheitsgraden (2 DOF) aus [1,2].

Die verschiedenen Modelle für die Lenkmechanik werden jeweils um ein Modell eines stromgeregelten EPS-Motors erweitert und bilden mit diesem das Modell der Regelstrecke.

3. Reglungssystem mit verschiedenen Modellen für Lenkmechanik

Bild 2 zeigt das Regelungssystem bestehend aus dem dynamischen LQG-Kompensator und dem Modell der Regelstrecke. Als Kompensator wird hier die Zusammenschaltung eines optimalen Zustandsreglers (LQR) und eines optimalen Zustandsbeobachters (LQE) bezeichnet. Dieser wird mit dem zuletzt genannten Modell (2 DOF) entworfen. Bei der in [1,2] vorgestellten Handmomentenregelung kann das Torsionsstabmoment T_{tb} als Regelgröße aufgefasst werden. Der optimale Zustandsregler (LQR) stellt die Regelgröße T_{tb} auf den extern erzeugten Sollwert für das Fahrerhandmoment T_{req} ein. Eine Störgrößenaufschaltung kompensiert Reibung und von außen wirkende Kräfte. Zudem ermöglicht der Regler eine aktive Dämpfung der durch die Elastizität des Torsionsstabes auftretenden Schwingungen. Da nicht alle Zustandsgrößen messbar sind wird ein optimaler Zustandsbeobachter (LQE) zur Rekon-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

struktion der Zustandsgrößen und zur Schätzung der Störgrößen genutzt. Der Regler ist so ausgelegt, dass die im realen System auftretenden Begrenzungen im Normalbetrieb nicht ansprechen. Die Bandbreite der Regelung beträgt aus diesem Grund etwa 80 rad/s. Zur Darstellung der Unterschiede im Verhalten der Regelung wird im Folgenden für das Modell der Regelstrecke zum einen das Entwurfsmodell mit zwei Freiheitsgraden (2 DOF) und zum anderen das Modell mit acht Freiheitsgraden (8 DOF) verwendet.

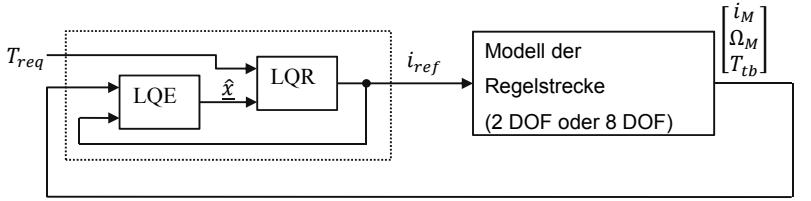


Bild 2: Regelungssystem mit dynamischem LQG-Kompensator

Bezüglich des Entwurfsmodells weist die Regelung erwartungsgemäß gute Eigenschaften auf. Die Führungssprungantwort in Bild 3 zeigt ein schnelles und gut gedämpftes Einschwingverhalten des Torsionsstabmomentes. Die Kurven sind für LQR und LQG identisch.

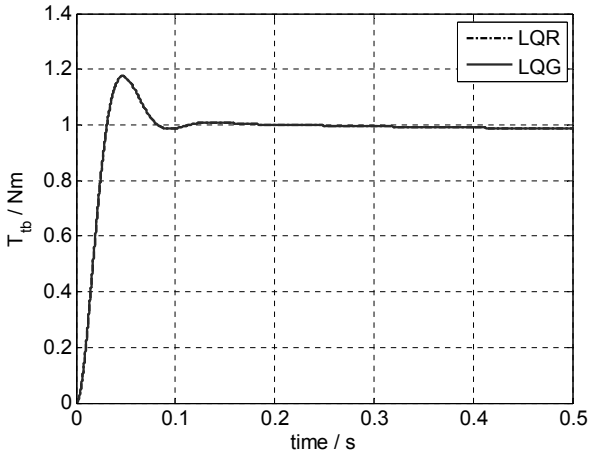


Bild 3: Führungssprungantwort, Regelstrecke mit zwei Freiheitsgraden

Am Frequenzgang des offenen Regelkreises können die Robustheitseigenschaften bewertet werden. Dazu wird der Regelkreis am Eingang der Regelstrecke aufgetrennt und der Über-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

tragungspfad von diesem Eingang zum Reglerausgang betrachtet. Wie Bild 4 zu entnehmen ist, besitzt der Regelkreis eine Phasenreserve von 71 ° und eine unendliche Amplitudenreserve.

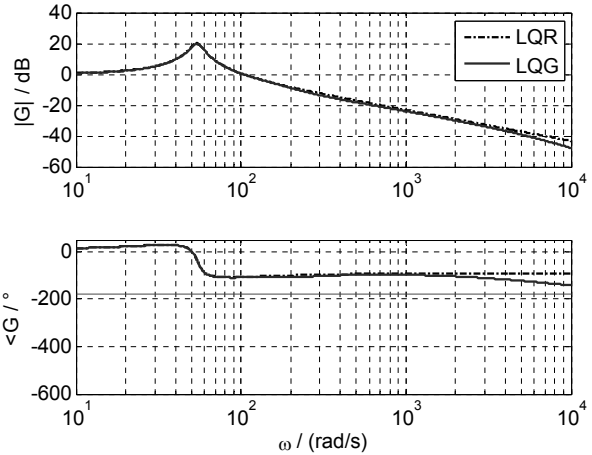


Bild 4: Frequenzgang des offenen Regelkreises, Regelstrecke mit zwei Freiheitsgraden

Wird der gleiche Regler am Modell der Regelstrecke mit acht Freiheitsgraden betrieben, so ist in der Führungssprungantwort in Bild 5 eine schwach gedämpfte Schwingung sichtbar. Dies führt zu einem nicht gewünschten Lenkgefühl und deutet auf eine geringere Stabilitätsreserve hin. Der Frequenzgang des offenen Regelkreises in Bild 6 bestätigt dies. Die Phasenreserve beträgt 64 °, jedoch ist nur eine minimale Amplitudenreserve von 1,5 dB vorhanden. Bereits bei geringen Änderungen einiger Steifigkeiten im Modell der Lenkmechanik, die im realen System ohnehin durch Nichtlinearitäten, Fertigungstoleranzen und Alterung auftreten, kann die Regelung instabil werden.

Ein Vergleich der Frequenzgänge aus Bild 4 und Bild 6 zeigt bereits im unteren Frequenzbereich Unterschiede. Die Frequenz der Resonanz ist von etwa 54 rad/s nach 48 rad/s verschoben und ab etwa 100 rad/s weichen die Frequenzgänge deutlich voneinander ab. Die Ursachen dafür sind auf die verwendeten Modelle für die Lenkmechanik zurückzuführen. Diese werden im folgenden Abschnitt genauer analysiert.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

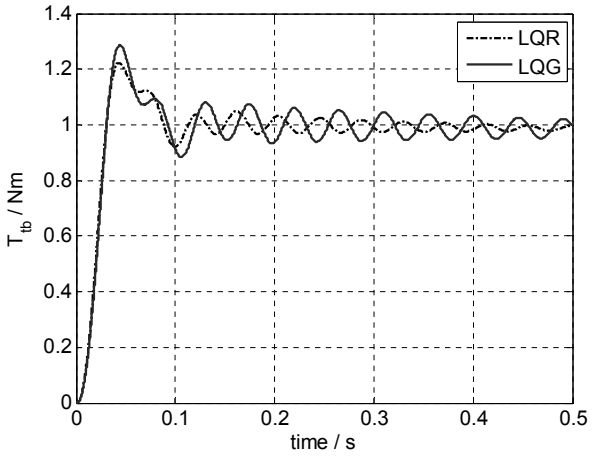


Bild 5: Führungssprungantwort, Regelstrecke mit acht Freiheitsgraden

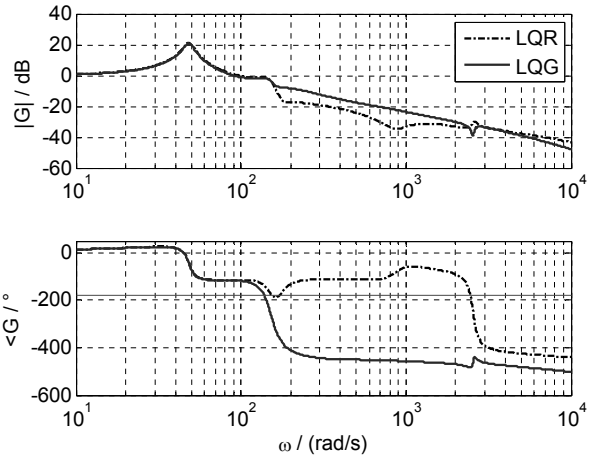


Bild 6: Frequenzgang des offenen Regelkreises, Regelstrecke mit acht Freiheitsgraden

4. Analyse der Modelle der Lenkmechanik

In diesem Abschnitt werden die Unterschiede zwischen den Modellen mit zwei und mit acht Freiheitsgraden (2 DOF und 8 DOF) dargestellt. Dazu wurden die für die Regelung relevanten Eigenwerte, Frequenzgänge und Eigenschwingungsformen untersucht.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In Tabelle 1 sind die Beträge der Eigenwerte der Modelle aufgeführt. Das Modell mit acht Freiheitsgraden besitzt neben zwei reellen Eigenwerten für die Starrkörperbewegung, sieben komplexe Eigenwertpaare, die den auftretenden elastischen Schwingungen zuzuordnen sind. Die zuvor genannte Verschiebung der Resonanz in den Frequenzgängen wird an den unterschiedlichen Werten für die Eigenfrequenz ω_{01} zu deutlich.

Tabelle 1: Eigenwerte der Modelle für Lenkmechanik

	1/T	1/T	ω_{01}	ω_{02}	ω_{03}	ω_{04}	ω_{05}	ω_{06}	ω_{07}
8 DOF: $\lvert\lambda_k\rvert$ / (rad/s)	0	3,7	48,43	148,4	174,4	951,5	1949	2569	7340
2 DOF: $\lvert\lambda_k\rvert$ / (rad/s)	0	3,7	54,43						

Durch Betrachtung eines äquivalenten Feder-Masse-Systems kann die Eigenfrequenz für ω_{01} für das Modell mit acht Freiheitsgraden mit sehr guter Näherung durch die Gleichung

$$\omega_{01} \approx \sqrt{\frac{c_{res}}{J_{res}}} \tag{1}$$

berechnet werden. Dabei treten in der Gleichung

$$c_{MP} = \frac{c_{NR} \cdot c_{NC} \cdot c_{CV}}{c_{NC} \cdot c_{CV} + c_{NR} \cdot c_{CV} + c_{NR} \cdot c_{NC}} \cdot \frac{1}{i_{PR}^2} \tag{2}$$

und

$$c_{res} = \frac{c_{tb} \cdot c_{MP}}{c_{tb} + c_{MP}} \tag{3}$$

Ausdrücke für in Reihe geschaltete Federn auf.

$$J_{res} = \frac{J_S \cdot \left(J_M + \frac{J_N}{i_{MN}^2}\right) \cdot i_{MP}^2}{J_S + \left(J_M + \frac{J_N}{i_{MN}^2}\right) \cdot i_{MP}^2} \tag{4}$$

Durch Vergrößerung der Werte für die Flankensteifigkeit c_{NR}, der Steifigkeit der axialen Mutterlagerung c_{NC} und Steifigkeiten der Gehäuseaufhängung c_{CV} strebt die Eigenfrequenz ω_{01} des Modells mit acht Freiheitsgraden gegen die Eigenfrequenz ω_{01} des Modells mit zwei Freiheitsgraden. Durch Erhöhung dieser Steifigkeiten verbessert sich das Verhalten der Regelung in Richtung des ursprünglichen Verhaltens (Bild 3 und Bild 4). Dies kann in der Praxis aus Gründen, wie z.B. der Geräuschminimierung nicht umgesetzt werden.

Auch in dem in Bild 7 dargestellten Frequenzgang vom Antriebsmoment T_M des EPS-Motors zum Torsionsstabmoment T_{tb} sind die oben genannten Unterschiede zwischen den beiden Modellen sichtbar.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

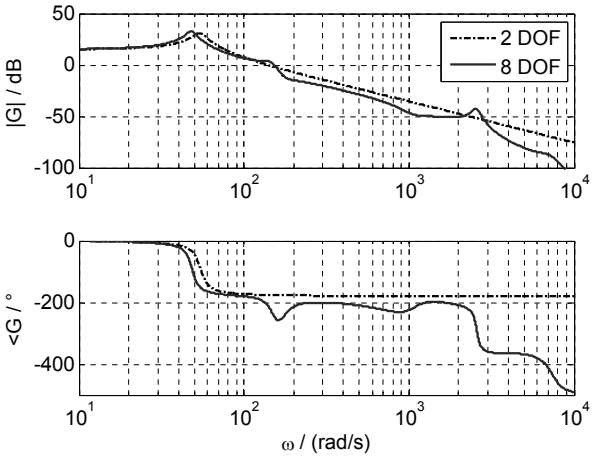


Bild 7: Frequenzgang vom Antriebsmoment T_M zum Torsionsstabmoment T_{tb}

Wie Bild 7 zu entnehmen ist treten deutliche Unterschiede bereits in dem für die Regelung relevanten Frequenzbereich bis etwa 200 rad/s auf. In diesem Bereich enthält das Modell mit acht Freiheitsgraden eine weitere Resonanz bei etwa 148 rad/s, die der Eigenfrequenz ω_{02} zuzuordnen ist. Eine Tilgung bei etwa 174 rad/s kann der elastischen Ankopplung der Räder zugeordnet werden und lässt sich mit der Gleichung

$$\omega_T \approx \sqrt{\frac{c_{RW}}{\frac{J_W}{i_{RW}^2}}} \tag{5}$$

nachvollziehen.

Im Folgenden werden für einen weiteren Einblick in das dynamische Verhalten der Lenkmechanik die Eigenschwingungsformen analysiert. Durch Darstellung der Amplituden und Phasenwinkel der Lagekoordinaten wird gezeigt, wie die einzelnen Körper an den Eigenschwingungsformen beteiligt sind. Dabei sind die Amplituden mit Hilfe der Übersetzungsverhältnisse auf ein gemeinsames Niveau skaliert. Für die Regelung sind nur die Eigenschwingungsformen zu den Eigenfrequenzen ω_{01} und ω_{02} relevant, da die übrigen Eigenfrequenzen außerhalb der Bandbreite der Regelung liegen. Im Modell mit zwei Freiheitsgraden ist die erste Eigenschwingungsform (Bild 8, links) durch die Torsionsstabsteifigkeit bestimmt. Die übrigen Steifigkeiten in diesem Modell wurden unendlich groß und damit die Verbindungen zwischen entsprechenden Körpern starr angenommen. Aufgrund dessen weisen diese Körper gleiche

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Auslenkungen auf. Die Amplituden und Phasenwinkel dieser Körper sind zum besseren Vergleich mit dem Modell mit acht Freiheitsgraden in den Eigenschwingungsformen dargestellt und auf Grund der starren Verbindungen jeweils für die Körper identisch.

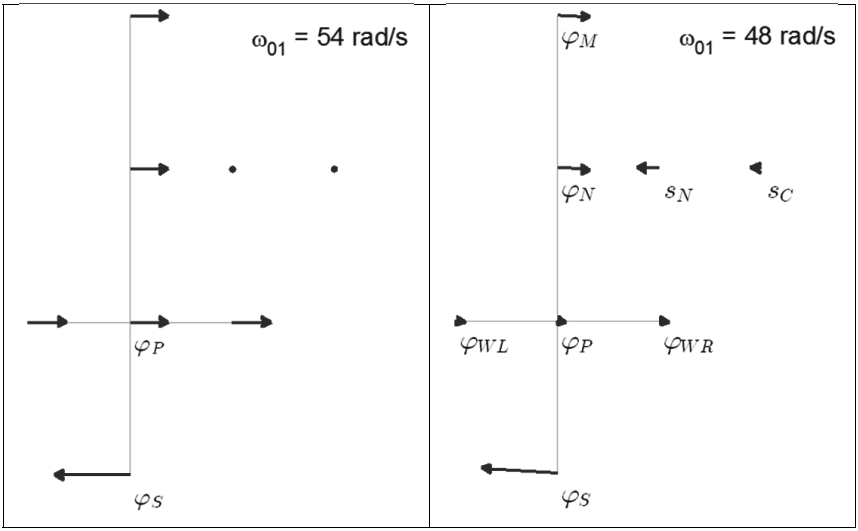


Bild 8: Eigenschwingungsform zur Eigenfrequenz ω_{01}, 2 DOF (links) und 8 DOF (rechts)

Der Vergleich beider Eigenschwingungsformen in Bild 8 zeigt, dass die Modelle grundsätzlich ein ähnliches Verhalten aufweisen, jedoch unterscheiden sich einige Amplituden in der Größe. Aus der Darstellung für das Modell mit acht Freiheitsgraden in Bild 8 ist ableitbar, dass die elastischen Verbindungen mit den zugehörigen Steifigkeiten für die Flanken des Kugelgewindetriebs c_{NR}, der axialen Mutterlagerung c_{NC} und der Gehäuseaufhängung c_{CV} Verformungen erfahren und somit diese Eigenschwingungsform beeinflussen. Auch die zuvor beschriebenen Unterschiede der Eigenfrequenz ω_{01} sind auf diese Steifigkeiten zurückzuführen.

In der zweiten Eigenschwingungsform (Bild 9, links) sind die Auslenkungen der Räder dominant. Auch hier nehmen die zuvor genannten Steifigkeiten Einfluss auf das Schwingungsverhalten. Diese Eigenschwingungsform ist zudem im Torsionsstabmoment

$$T_{tb} = c_{tb}(\varphi_S - \varphi_P), \tag{6}$$

das für die Regelung als Messgröße verwendet wird, sichtbar. Diese, für die Regelung parasitäre Eigenbewegung ist maßgeblich für die geringen Stabilitätsreserven verantwortlich. Im

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Frequenzgang des offenen Regelkreises in Bild 6 zeigt bei der zugehörigen Frequenz ein deutlicher Phasenabfall.

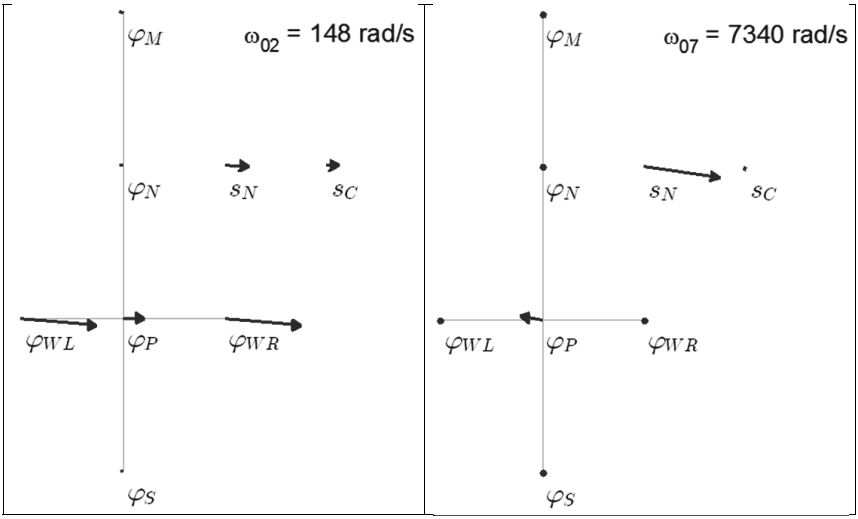


Bild 9: Eigenschwingungsformen zur Eigenfrequenz ω_{02} (links) und ω_{07} (rechts)

Die Eigenbewegung zu den höheren Eigenfrequenzen ω_{03} bis ω_{07}, haben auf den kontinuierlichen Regler geringen Einfluss. Jedoch können diese, abhängig von der Abtastfrequenz und der Beobachtbarkeit, bei der diskreten Realisierung zu Aliasing-Effekten führen. Anhand der Eigenschwingungsformen kann die Beobachtbarkeit durch die Messgrößen abgeschätzt werden. Beispielhaft ist in (Bild 9, rechts) die Eigenschwingungsform zur Eigenfrequenz ω_{07} dargestellt, welche durch die Amplitude für φ_P in der Messung des Torsionsstabmomentes sichtbar wird.

5. Entwurf einer verbesserten Regelung

In diesem Abschnitt wird ein Regelungsentwurf vorgestellt, der robuster gegen parasitäre Eigenbewegungen in der Regelstrecke ist. Die Struktur der Regelung und die verwendeten Messgrößen werden beibehalten (Bild 2).

Mit den Erkenntnissen aus der Modellanalyse wurde durch eine physikalisch motivierte Modellreduktion ein Modell mit drei Freiheitsgraden (3 DOF) erzeugt. Dieses enthält die für die Regelung relevanten Eigenbewegungen. Der Frequenzgang in Bild 10 zeigt, dass sich das

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

detaillierte und das reduzierte Modell im relevanten Frequenzbereich nahezu identisch verhalten. Mit diesem Modell wurde ein neuer Reglerentwurf durchgeführt.

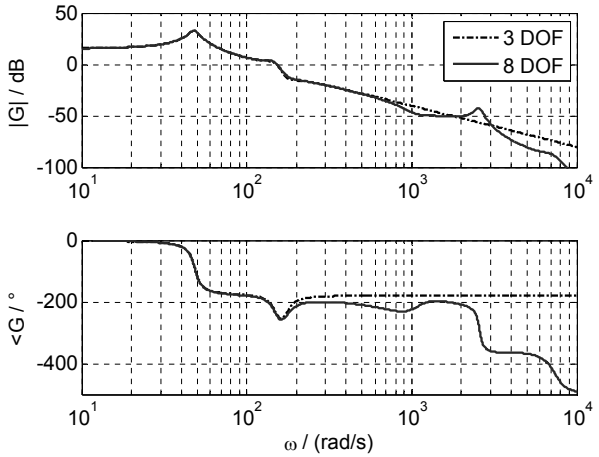


Bild 10: Frequenzgang vom Antriebsmoment T_M zum Torsionsstabmoment T_{tb}

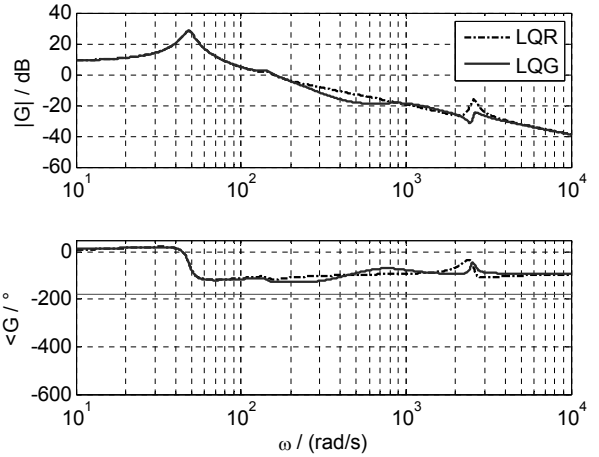


Bild 11: Frequenzgang des offenen Regelkreises, Regelstrecke mit acht Freiheitsgraden

Bild 11 zeigt den Frequenzgang des offenen Regelkreises mit dem neu entworfenen Regler und dem Modell mit acht Freiheitsgraden für die Regelstrecke.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Im Vergleich zum ursprünglichen Reglerentwurf aus Abschnitt 3 zeigen sich deutlich größere Stabilitätsreserven. Die Regelung weist bei gleicher Bandbreite eine Phasenreserve von 52 ° und eine unendliche Amplitudenreserve auf (Bild 11). In Parameterstudien haben sich bei einer Variation der Steifigkeiten im Modell mit acht Freiheitsgraden der Regelstrecke jedoch noch Robustheitsprobleme für die Regelung ergeben. Deren Analyse und eine weitere Verbesserung der vorgestellten Regelung ist Gegenstand der aktuellen Arbeiten.

6. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine bestehende Handmomentenregelung für EPS-Systeme untersucht. Durch die Verwendung eines detaillierten Modells der Lenkmechanik konnte der Effekt parasitärer Eigenbewegungen gezeigt und die Auswirkung auf die Regelung dargestellt werden. Es wurde gezeigt, durch welche dieser parasitären Eigenbewegungen die Regelung nachteilig beeinflusst wird. Eine Maßnahme zur Verbesserung der bestehenden Regelung wäre die Vergrößerung bestimmter Steifigkeiten. Die Umsetzung in der Serie ist in der Regel nicht möglich.

Ebenso wurde gezeigt, dass hochfrequente Eigenbewegungen in den Messgrößen enthalten sind. Diese können bei der diskreten Realisierung des Reglers zu Problemen durch Aliasing führen.

Auf Basis der Erkenntnisse aus der Analyse des Modells der Lenkmechanik und des Regelungssystems wurde ein neues Modell der Lenkmechanik für einen verbesserten Entwurf der Regelung abgeleitet. Diese verbesserte Regelung weist eine größere Robustheit gegenüber parasitärer Eigenbewegungen, jedoch noch eine nicht ausreichende Robustheit gegenüber Parameteränderungen auf. Ziel aktueller Arbeiten ist es, diese Reglung in Bezug auf ihre Robustheit, auf Nichtlinearitäten im Modell der Lenkmechanik und Effekten bei der diskreten Realisierung des Reglers zu untersuchen und weiterzuentwickeln.

7. Literaturangaben

[1] Henrichfreise, H., Jusseit, J., Niessen, H.: Optimale Regelung einer elektromechanischen Servolenkung. Fulda: VDI-Tagung Mechatronik 2003

[2] Graßmann, O., Henrichfreise, H., Niessen, H., v. Hammel, K.: Variable Lenkunterstützung für eine elektromechanische Servolenkung. Stuttgart: Elektronik im KFZ, Haus der Technik 2003

[3] Balas, M. J., Feedback Control of Flexible Systems. IEEE Transactions on Automatic Control 1978

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Modellbasierte Untersuchung der Zuverlässigkeit algorithmisch bestimmter kritischer Stellen in Straßennetzwerken

M.Sc. **Sven Henning**, M.Sc. **Patrick Biemelt**,
M.Eng. **Kareem Abdelgawad**, Dr.-Ing. **Sandra Gausemeier**,
Prof. Dr.-Ing. habil**. Ansgar Trächtler**,
Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn

Kurzfassung

Im Rahmen der Forschung zum autonomen Verkehrsmanagement wurde ein neuartiger, verteilter Regelungsansatz entwickelt, der Konsensalgorithmen einsetzt. Ziel dieses Ansatzes ist es, in einem abgegrenzten Verkehrsnetz eine makroskopische Größe, wie etwa die Verkehrsdichte, auszubalancieren. Hierdurch können Stauungen vermieden und der Durchsatz maximiert werden. Für diesen neuen Ansatz ist es erforderlich, ein Straßennetz in seiner Gesamtheit in Teilgebiete zu trennen, die jeweils gesondert betrachtet werden. In dieser Arbeit wird die Zuverlässigkeit einer algorithmischen Methodik untersucht, die die Ursprünge solcher Teilgebiete ausschließlich auf Grundlage der Straßennetztopologie bestimmt, in dem sie für eine Vielzahl gleichartiger, deutscher Städte angewandt wird und die Ergebnisse ausgewertet werden.

Abstract

Latest research in the field of fully autonomous driving led to a new control approach based on decentralized control algorithms, which uses consensus methods. The aim of this new approach is to balance a macroscopic traffic value such as the traffic density, within a road network segment of limited area to avoid traffic jams and to maximize the throughput. For this approach, it is however necessary to divide the road network into multiple individual segments of limited area in an adequate way. This work analyses the reliability of an algorithmic metric which determines initial locations for such segments by only considering the road network topology. Therefore the metric is applied to a quantity of similar German cities and the results are discussed in this contribution.

1. Einleitung

Ein neuartiger und vielversprechender Ansatz zur gesamtheitlichen Steuerung des Verkehrs basiert auf sog. Konsensalgorithmen [10]. Dieser Ansatz ist auf der Ebene des makroskopisch beschriebenen Verkehrs angesiedelt, auf der der Verkehr nicht durch einzelne Fahr-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

zeuge bzw. ihren Trajektorien, sondern, in Analogie zu Fluiden, durch Flussgrößen dargestellt wird. Für einen Streckenabschnitt können die charakteristischen Größen Verkehrsdichte $\rho\ (Fzg./km)$, mittlere Geschwindigkeit $v\ (m/s)$ sowie der Verkehrsfluss $q\ (Fzg./s)$ herangezogen werden. In dem neuartigen Ansatz wird ein zu Grunde liegendes Straßennetz in inselfreie, kleinere Teilgebiete, sog. Bilanzräume, unterteilt.

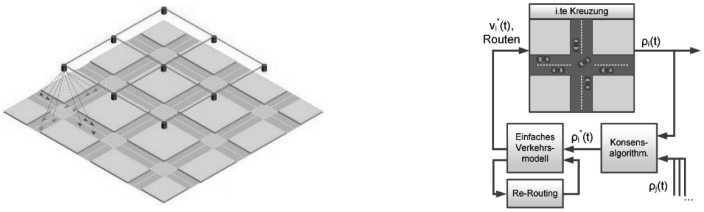


Bild 1: (1) Beispiel eines Bilanzraumes, (2) Regelkreis auf Basis des Konsensalgorithmus

Für jede Kreuzung des Bilanzraumes wird ein Kreuzungsmanager mit einer Instanz des Konsensalgorithmus eingeführt, der die Möglichkeit hat, die in seine Kreuzung einfahrenden Fahrzeuge bezüglich der mittleren Geschwindigkeit zu beeinflussen. Da alle Kreuzungsmanager eines Bilanzraumes miteinander vernetzt sind und kommunizieren können, tauschen diese Informationen über die Verkehrsdichten der Einfahrspuren aus. Auf diese Weise ist es möglich, dass alle Kreuzungsmanager die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge derart koordinieren, dass Kreuzungen mit relativ hoher Verkehrsdichte entlastet und Kreuzungen mit relativ geringer Verkehrsdichte „verdichtet“ werden, so dass im Mittel alle Kreuzungen nach einer Zeit die gleiche Verkehrsdichte aufweisen. Dieser Zustand wird als (Durchschnitts-)Konsens bezeichnet. Ob der Konsenszustand stabil erreicht werden kann und wie schnell dies möglich ist hängt maßgeblich von der Kommunikationstopologie der Kreuzungen ab, welche eine charakteristische Eigenschaft von Konsensalgorithmen allgemein darstellt. Da eine kontinuierliche Rückführung von Messgrößen im System vorliegt und der Sollwert dem Mittelwert aller Messgrößen entspricht kann alternativ auch von einer Regelung gesprochen werden. Voraussetzung für diesen Ansatz ist, dass die Fahrzeuge bereits die Fähigkeit besitzen, autonom und kollisionsfrei Kreuzungen zu passieren, daher werden in diesem Szenario keine Verkehrsregeln und -leitsysteme berücksichtigt.

Ein Beispiel für einen Bilanzraum ist in Bild 1.(1) zu sehen. Der angeführte Bilanzraum ist ein einfaches symmetrisches Beispiel mit neun Kreuzungen und neun Kreuzungsmanagern, welches für erste Untersuchen herangezogen wurde. Bild 1.(2) zeigt eine schematische Darstellung eines Regelkreises, der in jeder einzelnen Kreuzung des Bilanzraumes implemen-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

tiert ist. Die gemessene Verkehrsdichte $\rho_i(t)$ der Kreuzung wird neben den Messgrößen der benachbarten Kreuzungen kontinuierlich in die Konsensberechnung geführt, aus der eine neue Sollverkehrsdichte ermittelt wird, die gegen die mittlere Verkehrsdichte strebt. Da diese Verkehrsdichte jedoch nicht direkt als Sollgröße verwendet werden kann, wird mit Hilfe eines einfachen Verkehrsmodells eine mittlere Sollgeschwindigkeit berechnet und den in die Kreuzung einfahrenden Fahrzeugen aufgeprägt. Eine Erweiterung des Ansatzes stellt eine Zuteilung von neuen Routen für die Fahrzeuge dar.

Der gezeigte Ansatz konnte als Verkehrsleitsystem in ersten simulativen Untersuchungen signifikate Verbesserungen gegenüber einfachen Regeln (Rechts-Vor-Links), einfachen Lichtsignalanlagen sowie optimierten Lichtsignalanlagen erzielen, die eine Fortsetzung der Untersuchungen rechtfertigen.

In realen Straßennetzen sind Ausschnitte, wie in Bild 1.(1) dargestellt, kaum zu finden [7]. Gerade das europäische Straßennetz weist eine zumeist nicht symmetrische und organische Gestalt auf. Der zuvor erwähnte Ansatz basiert darauf, dass das Straßennetz inselfrei in Bilanzräume eingeteilt wird. Bisher fehlte für diese Einteilung (Urpsrung und Ausdehnung) jedoch eine geeignete Methodik. Aus diesem Grunf wurde daher in [3] ein Beurteilungsalgorithmus präsentiert, der auf Grundlage der Straßennetztopologie kritische Straßen findet und mit diesen Ergebnissen geeignete Ursprünge für Bilanzräume ermitteln kann. Dazu wird das Straßennetz als geometrischer Graph modelliert und verschiedene Algorithmen zur Bestimmung möglicher kritischer Straßen (Straßen mit übermäßigem Verkehrsaufkommen) werden auf diesen angewandt. In Bild 2.(1) ist die grundsätzliche Funktion der Methodik dargestellt. Auf einem als geometrischen Graph modellierten Straßennetz werden verschiedene Algorithmen (sog. Zentralitätsmetriken) angewandt, durch die eine Beurteilung aller Straßen hinsichtlich der Kritikalität vorgenommen wird und eine gewichtete binäre Entscheidung für jede Straße getroffen wird.

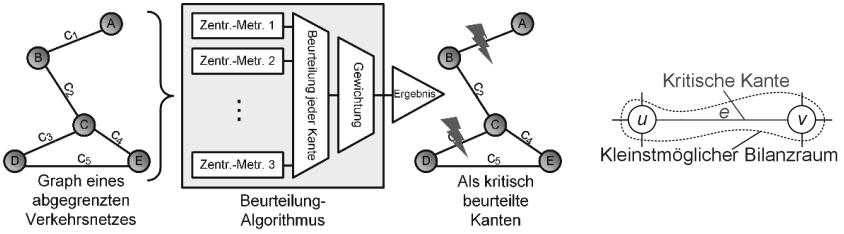


Bild 2: (1) Schematisch dargestellte Funktionsweise des Beurteilungsalgorithmus (2) Beispiel für den kleinstmöglichen Bilanzraum mit einer kritischen Straße.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Erste Untersuchungen der Anwendung dieser Methodik führten zu aussichtsreichen Ergebnissen [5]. In diesem Beitrag wird daher eine umfassende Untersuchung angestrengt, die klären soll, wie zuverlässig und reproduzierbar die mit dem Beurteilungsalgorithmus erzeugten Ergebnisse sind. Dazu wird der Beurteilungsalgorithmus auf eine Vielzahl mittelgroßer deutscher Städte angewandt, einschließlich einer Auswertung der Ergebisse. Um die bestmögliche Beeinflussbarkeit durch den Regelkreis zu erzielen, werden kritische Straßen in die Bilanzräume und nicht auf deren Grenzen gelegt (vgl. Bild 2.(2)).

In Kapitel 2 wird zunächst die Modellbildung eines realen Straßennetzteilgebiets als geographischer Grapher erläutert, die als Grundlage dient. Kapitel 3 beschreibt die Erzeugung simulativer Referenzdaten, die zur späteren Bewertung der Ergebnisse des Beurteilungsalgorithmus essentiell sind. Im vierten Kapitel wird daraufhin der Beurteilungsalgorithmus selbst beschrieben und anhand eines Beispiels verdeutlicht. Das letzte Kapitel umfasst die Untersuchung der Zuverlässigkeit des Beurteilungsalgorithmus sowie die abschließende Zusammenfassung.

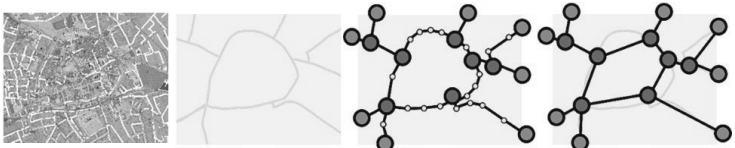
2. Modellierung von Straßennetzen als Graphen

Zunächst sei die Definition eines ungerichteten Graphen gegeben, die für die nachfolgenden Erläuterungen hilfreich ist:

Ein Graph G besteht aus einer Menge V von Knoten sowie einer Menge E von Kanten:

$$G = (V, E), E \subseteq \{\{v, w\} | v, w \in V, v \neq w\}.$$

Grundlage des Beurteilungsalgorithmus ist, dass ein Straßennetzausschnitt als geometrischer Graph vorliegt, der einen Spezialfall eines Graphen darstellt, bei dem die geometrischen Positionen der Knoten von Bedeutung sind. Für die Untersuchung werden reale Straßennetzausschnitte betrachtet, die über den Dienst OpenStreeMap (OSM) [8] frei verfügbar sind und in geometrische Graphen überführt werden. Bild 3 zeigt schematisch das automatisierte Vorgehen der Extraktion und Überführung der Straßennetzausschnitte in geometrische Graphen.



(1) (2) (3) (4)

Bild 3: (1) – (4) Vorgehen bei der Konvertierung von realen Straßennetzdaten aus OpenStreetMap zu einem geographischen Graphen

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Zunächst liegt ein exportiertes Straßennetzteilgebiet mit allen zugehörigen Informationen vor 3.(1). Diese Daten werden derart gefiltert, dass nur noch essentiell notwendige Daten vorliegen, also Straßen und Kreuzungen 3.(2). Aus diesen Daten wird ein geographischer Graph erzeugt, der aus Ein-/ und Ausgangsknoten (rot), Kreuzungsknoten (grün) und Kanten verfügt. Der Zusammenhang zum Straßennetz ist hierbei offensichtlich, Knoten entsprechen Kreuzungen während Kanten die Straßen zwischen Kreuzungen darstellen. Zwischen den Knoten können zudem Stützknoten zur Approximation der Kurvenverläufe (gelb) vorliegen 3.(3). Im letzten Schritt werden die Stützknoten entfernt, sodass im Graph lediglich Ein-/Ausgangsknoten, Kreuzungsknoten und direkte Kanten mit Kantengewichten verbleiben.
Die erwähnten Kantengewichte können von verschiedenen Metadaten aus dem OSM-Straßennetzteilgebiet übernommen bzw. errechnet werden. In diesem Kontext können daher drei Modellierungstiefen definiert werden.

Tabelle 1: Vergleich der verschiedenen Modellierungstiefen

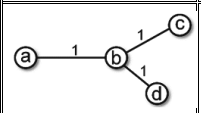
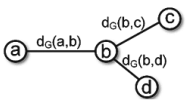
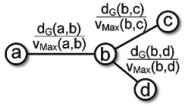
Modellierungs-tiefe	Standard $[-]$	Entfernung $[m]$	Reisedauer $[s]$
Beispiel			

Tabelle 1 zeigt die möglichen Modellierungstiefen für den geographischen Graphen. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, dass die Kanten zwischen den Knoten zu konstant 1 angenommen werden. Werden jedoch die tatsächlichen geometrischen Eigenschaften der Straßenverläufe berücksichtigt, so können die Kantengewichte außerdem aus der Länge oder der Reisedauer der Straßen bestimmt werden, bei Letzterem wird dafür zusätzlich die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit einbezogen.

3. Erzeugung von Referenzdaten

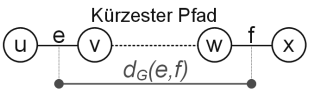
Für die Validierung der Ergebnisse des Beurteilungsalgorithmus ist es notwendig, Referenzdaten zu erzeugen. Da das beschriebene Szenario der vollständig autonom fahrenden Fahrzeuge in einem Straßennetz ohne feste Vorfahrtsregeln und Lichtsignalanlagen nicht real vorliegt, wird hierfür auf Simulationsdaten zurückgegriffen. Die Simulationsumgebung SUMO [6] bietet die Möglichkeit, für einen gegebenen Straßennetzausschnitt (z.B. aus OSM) eine Vielzahl von Fahrzeugen mit zufälliger Routenwahl zu simulieren. Dabei interagieren die Fahrzeuge intelligent und halten beispielsweise Abstände und Geschwindigkeiten ein. Der

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Simulation können neben weiteren Messdaten die Verkehrsdichte, die Belegtheit oder die mittleren Geschwindigkeit jeder Straße entnommen werden. Zur simulativen Beurteilung der Kritikalität als Referenz zum zuvor erwähnten Beurteilungsalgorithmus wurde die Verkehrsdichte herangezogen, die diese sich als geeignete Vergleichsgröße herausstellte. Für mehrere exemplarische Simulationen von Straßennetzteilgebieten deutscher Städte wurden Histogramme der Verkehrsdichtenklassen ermittelt, aus denen sich ein annähernd konstantes Verhältnis zwischen kritischen und nicht kritischen Straßen ableiten ließ. Folgt man der Annahme, dass deutsche Städte geleichartige Straßennetzstrukturen aufweisen [7], lässt sich dieses Verhältnis auch auf andere deutsche Städte übertragen. Darauf basierend können mittels Simulation durch SUMO kritische Straßen in beliebigen Straßennetzen identifiziert werden, was beispielhaft in Bild 6.(1) zu sehen ist. Hier sind die als simulativ kritisch markierten Straßen rot gefärbt.

4. Beurteilungsalgorithmus auf Grundlagen von Zentralitätsmetriken

Im Folgenden wird der zuvor erwähnte Beurteilungsalgorithmus im Detail erläutert, welcher auf Zentralitätsmetriken basiert. Zentralitätsmetriken sind Berechnungsvorschriften, die für jeden Knoten bzw. jede Kante eines gegebenen Graphen G numerische Werte berechnen, aus denen topologische Eigenschaften wie die Kritikalität abgeleitet werden können [4]. Bereits in [3] wurden Zentralitätsmetriken verwendet, um charakteristische Stellen in Straßenetzen zu finden. In Gegensatz zu [3] wird in diesem Beitrag jedoch ausschließlich auf Zentralitätsmetriken zurückgegriffen, die Werte für Kanten, nicht jedoch für Knoten, berechnen, da die simulativ ermittelten Referenzdaten nicht für Knoten verwendet werden können. Da sehr viele Zentralitätsmetriken auf kürzesten Pfaden zwischen Knotenpaaren basieren, wurde eine Definition für die Länge kürzester Pfade zwischen zwei Kanten eingeführt, die auf Knotendistanzen basiert:



$$d_G(e,f) = \frac{d_G(u,v)}{2} + \min\{d_G(u,w), d_G(u,x), d_G(v,w), d_G(v,x)\} + \frac{d_G(w,x)}{2}$$

Bild 4: Kürzester Pfad zwischen zwei Kanten mit angegebener Berechnungsvorschrift basierend auf kürzesten Pfaden zwischen Knoten

Aufgrunf der Vielzahl verfügbarer Zentralitätsmetriken existieren [1][2] wurde eine als geeignet erscheinende Vorauswahl getroffen, die in Tabelle 2 dargestellt ist. Alle aufgeführten Zentralitätsmetriken beziehen sich auf Kanten nach der in Bild 4 gegebenen Defintion. Die *Edge-Betweenness*-Zentralität bestimmt für eine Kante e das Verhältnis aller

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

kürzesten Pfade zwischen allen Kanten, die über e führen, zu allen kürzesten Pfaden zwischen allen Kanten und kann als Belastungsindex interpretiert werden. Im Falle der *Edge-Closeness*-Zentralität wird hingegen berechnet, wie nah die betrachtete Kante e zu allen restlichen Kanten liegt. Hierzu wird die reziproke Summe der Längen aller kürzesten Pfade zwischen der betrachteten Kante e und den restlichen Kanten betrachtet. Liegen viele Kanten nahe beieinander, so steigt dieser Wert für Kanten in der Umgebung (Clustering). Die *Edge-Closeness-Vitality*-Zentralität wird bestimmt, indem auf den Graphen G zweimal dieselbe Funktion angewandt wird, einmal mit und einmal ohne die betrachtete Kante e. Die Differenz der Resultate ergibt den Zentralitätswert. In dem angeführten Fall wird als Funktion der Wiener-Index herangezogen, der die Summe der Längen aller kürzesten Pfade zwischen allen Kanten berechnet.

Tabelle 2: Auswahl der verwendeten Zentralitätsmetriken zur Beurteilung

Zentralitäts-metrik	Edge-Betweenness-Zentralität $c_{EBC}(e)\ mit\ e \in E$	Edge-Closeness-Vitality-Zentralität $c_{CV}(e)\ mit\ e \in E$	Edge-Closeness-Zentralität $c_{ECC}(e)\ mit\ e \in E$
Zugehörige Berechnungs-vorschrift für Kante e des Graphen G	$c_{EBC}(e) = \sum_{e \neq f \neq g} \frac{\sigma_e(f,g)}{\sigma(f,g)}$ $mit\ f,g \in E$ $\sigma_e(f,g)$: Anzahl aller kürzesten Pfade von f zu g, die e passieren $\sigma(f,g)$: Anzahl aller kürzesten Pfade von f zu g	Mit dem Wiener-Index: $I_W(G) = \sum_f \sum_g d_G(f,g)$ $mit\ \ f,g \in E$ $\Rightarrow c_{CV}(G,e) = I_W(G) - I_W(G \backslash \{e\})$	$c_{ECC}(e) = \frac{1}{\sum d_G(e,f)}$ $mit\ f \in E$ $d_G(e,f)$: Länge des kürzesten Pfades zwischen e und f

Durch Anwendung der angegebenen Modellierungstiefen in Tabelle 2 können mit den benannten Zentralitätsmetriken numerische Werte für jede Kante eines Graphen berechnet werden. In Bild 5.(1) bis 5.(3) ist ein beispielhaftes Ergebnis für die Stadt Neusäß dargestellt. Die berechneten Werte von grün (niedrige Werte) bis rot (hohe Werte) zeigen deutlich, dass die hohen Werte der *Edge-Betweenness*- und der *Edge-Closeness*-Zentralität weniger häufige Vorkommnisse aufweisen als niedrige Werte und im Wesentlichen Hauptverkehrsadern treffen.

Der Beurteilungsalgorithmus basiert darauf, diese Ergebnisse zu nutzen und für jede Kante (entspricht einer Straße) mit den drei vorhandenen Zentralitätsmetriken binär zu entscheiden, ob die betrachtete Kante als kritisch oder unkritisch zu beurteilen ist. Dafür werden die

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Kanten mit den oberen Randwerten der Zentralitätsmetriken (rote Kanten in Bild 5.(1) - 5.(3)) mit abfallenden Werten herangezogen und solange als kritisch markiert, bis das gleiche Verhältnis zwischen nicht kritischen und kritischen Kanten erreicht wurde, welches in Kapitel 3 simulativ ermittelt wurde.

Da die Entscheidung pro Kante je nach Zentralitätsmetrik unterschiedlich ausfallen kann, folgt anschließend eine Gewichtung, durch die der Anteil der ermittelten kritischen Kanten pro Zentralitätsmetrik festgelegt werden kann.

In Bild 5.(4) ist das Gesamtergebnis des Beurteilungsalgorithmus für die Stadt Neusäß zu sehen. Die Zusammensetzung liegt hier nach Gewichtung bei 75% *Edge-Betweeness*-, 15% *Edge-Closeness-Vitality*- und 10% *Edge-Closeness*-kritischen Kanten.

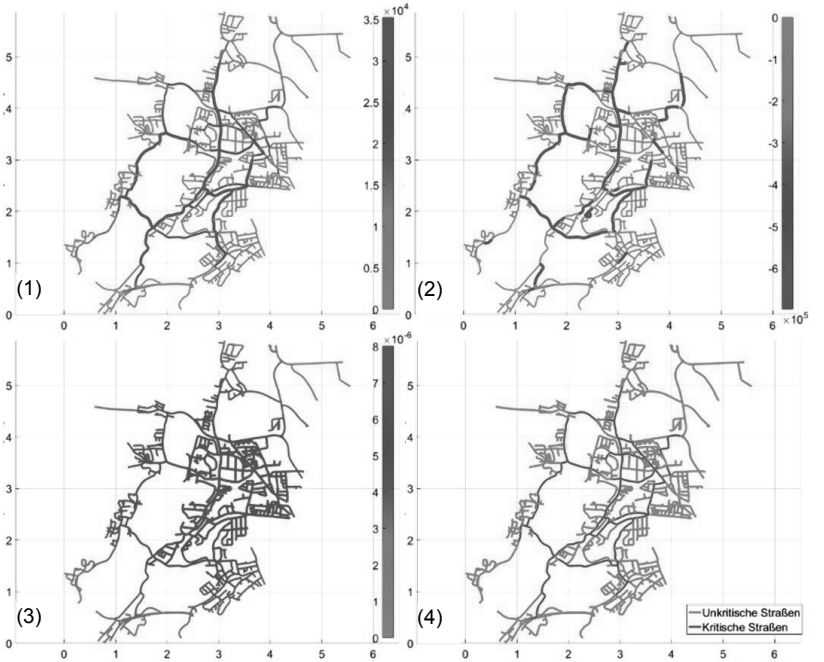


Bild 5: Achsenkoordinaten in $[km]$, Modellierungstiefe: Reisezeit, (1): *Edge-Betweeness*, (2): *Edge-Closeness-Vitality*, (3): *Edge-Closeness*, (4): Ergebnis Beurteilungsalgorithmus (binär)

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Wird dieses exemplarische Gesamtergebnis nun mit den Referenzdaten aus der Simulation abgeglichen, so ergibt sich ein Resultat wie in Bild 6 dargestellt.

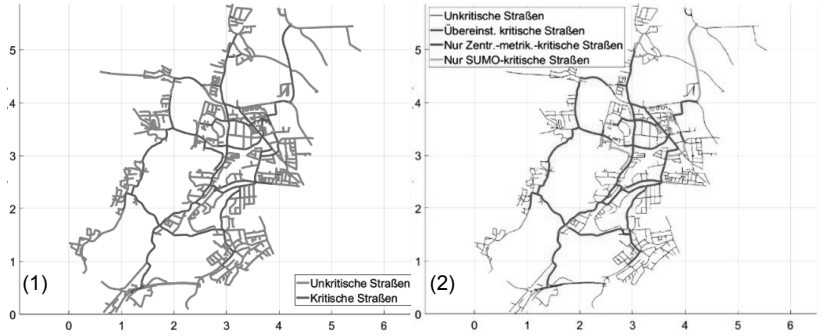


Bild 6: Achsenkoordinaten in $[km]$, (1) Ergebnis der SUMO-Simulation bezüglich Verkehrsdichten, (2) Vergleich zwischen simulativ und algorithmisch bestimmter kritischer Straßen

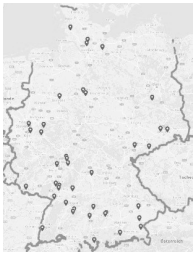
Bereits optisch kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Durch Auszählung der Kanten wird in diesem Beispiel eine Übereinstimmung von 76,37% erreicht.

5. Validierung und Zusammenfassung

Für die Untersuchung der Übereinstimmungszuverlässigkeit der simulativ und vom Beurteilungsalgorithmus ermittelten kritischen Kanten werden im Folgenden Ergebnisse anhand von 40 mittelgroßen deutschen Städten ausgewertet. Die berücksichtigten Städte können in Tabelle 3 sowie der Übersichtskarte eingesehen werden.

Tabelle 3: Berücksichtigte Städte der Untersuchung

1	Annaberg-Buchholz	9	Dingolfing	17	Kaltenkirchen	25	Pfullingen	33	Seligenstadt
2	Bad Friedrichshall	10	Enger	18	Kitzingen	26	Püttlingen	34	Senden
3	Bad Krozingen	11	Flörsheim am Main	19	Luckenwalde	27	Quickborn	35	Sonthofen
4	Bad Tölz	12	Gersthofen	20	Metzingen	28	Radeberg	36	Traunreut
5	Bergneustadt	13	Giengen an der Brenz	21	Mölln	29	Reichenbach im Vogtland	37	Waghäusel
6	Bruchköbel	14	Heide	22	Mühldorf am Inn	30	Rheinstetten	38	Weil der Stadt
7	Burscheid	15	Hemmingen	23	Neusäß	31	Sarstedt	39	Werdohl
8	Coswig	16	Hockenheim	24	Nidderau	32	Schifferstadt	40	Wülfrath



https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Ausgewählt wurden die Städte nach Fläche, Bevölkerung und Bevölkerungsdichte auf Grundlage des ZENSUS 2011 mit dem Gebietsstand vom 31.12.2015 [9]. Die Flächen der betrachteten Städte liegen in einem Bereich von $22{,}95 km^2$ bis $46{,}99 km^2$, die Einwohnerzahlen von 18002 bis 21909 und die Bevölkerungsdichte von $427\ EW/m^2$ bis $899\ EW/km^2$. Um den Einfluss der Gewichtungsfaktoren der einzelnen Zentralitätsmetriken auf die Endergebnisse des Beurteilungsalgorithmus zu untersuchen wurden drei statische Konfigurationen wie folgt festgelegt (Format: *Edge-Betweeness*-Anteil / *Edge-Closeness-Vitality*-Anteil / *Edge-Closeness*-Anteil): $(45\% / 45\% / 10\%)$, $(15\% / 75\% / 10\%)$ und $(75\% / 15\% / 10\%)$. Jedes Straßennetzteilgebiet wird automatisch an den Stadtgrenzen aus der Umgebung getrennt und für die Validierung jeweils mit 1000, 2000 und 5000 Fahrzeugen mittels SUMO simuliert. Daher ergeben sich insgesamt 360 Simulationen und Vergleiche $(3\ Gewichtungskonfigurationen \cdot 3\ Fahrzeugmengen \cdot 40\ Städte)$.

Bild 7 zeigt die gemittelten Ergebnisse der Übereinstimmung zwischen Simulation und Beurteilungsalgorithmus der 40 Städte. Es ist zu erkennen, dass die Gewichtungskonfiguration $(75\% / 15\% / 10\%)$ mit einer Trefferrate von 52% bis 56% die besten Ergebnisse erzielt. Außerdem werden bei dieser Konfiguration die wenigsten Straßen durch den Beurteilungsalgorithmus als kritisch erkannt, die es laut Simulation nicht sind. In dieser Konsequenz ist jedoch der Anteil der nur simulativ als kritisch erkannten Straßen zum Teil erhöht.

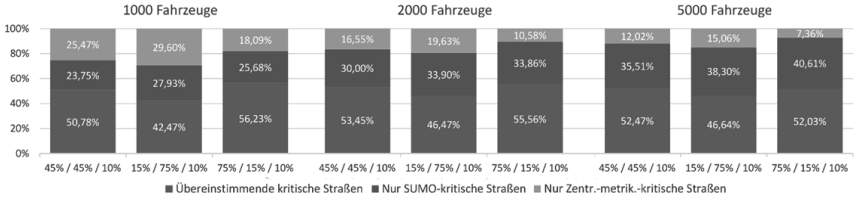


Bild 7: Vergleich der Übereinstimmung zwischen Simulation und Algorithmus per Auszählung, Prozentangaben: Gewichtung *Betweeness-* / *Closeness-Vitality-* / *Closeness*-Centrality

In Bild 8 sind die Ergebnisse beispielhaft für die feste Konfiguration $(75\% / 15\% / 10\%)$ pro Stadt aufgetragen. Es ist deutlich ersichtlich, dass die Übereinstimmung in Einzelfällen große Schwankungen aufweist (Trefferquoten von 30% bis 80%). Durch eine bessere Parametrierung der Gewichtungsfaktoren, ein dynamisch berechnetes Sollverhältnis und ggf. die Berücksichtigung weiterer Zentralitätsmetriken [2] könnten die Ergebnisse durchaus verbessert werden. Zieht man das in Kapitel 3 als statisch angenommen Verhältnis zwischen kritischen und nicht kritischen Straßen in Betracht (beträgt ca. 15%), so liegt mit dem Beurteilungsalgo-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

rithmus eine etwa siebenfach $(55\% / (15\% \cdot 50\%) = 7{,}33)$ höhere Treffergenauigkeit rein auf Grundlage der Straßennetztopologie vor, als sie durch binäre Zufallsentscheidungen erzielt werden könnten.

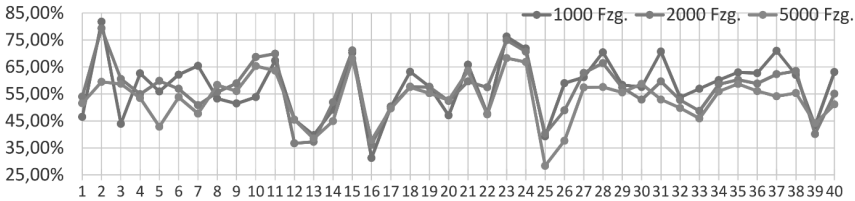


Bild 8: Verteilung der Übereinstimmung pro Stadt, Konfiguration: $(75\%, 15\%, 10\%)$

Mithilfe dieser Beurteilungsmetrik ist es möglich, für das Straßennetz einer mittelgroßen deutschen Stadt rein auf der Topologie basierend mögliche Ursprungsorte für Bilanzräume derart zu finden, das kritische Straßen möglichst innerhalb dieser liegen. Eine noch zu klärende Fragestellung wird in Konsequenz die Ausdehnung der Bilanzräume sein.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literatur:

[1] Brandes U., Erlebach T., “Network-Analysis”, Springer-Verlag, 1. Ausgabe, 2005

[2] CentiServer, comprehensive centrality resource and server for centralities calculation, web-based database for centrality indices, http://www.centiserver.org, 2016

[3] Demšar U., Ŝpatenková O., Virrantaus K., “Identifying Critical Locations in a Spatial Network with Graph Theory”, in Transaction in GIS, Ausgabe 1, Seiten. 61-82, 2008

[4] Gurski F., Rothe I., Rothe J., Wanke E., “Exakte Algorithmen für schwere Graphenprobleme”, Springer-Verlag, 1. Ausgabe., 2010

[5] Henning, S., Biemelt P., Abdelgawad K., Gausemeier S., Evers H., Trächtler A., „Methodology for Determining Critical Locations in Road Networks based on Graph Theory“, IFAC World Congress 2017

[6] Krajzewicz D., Erdmann J., Behrisch M., Bieker L., “Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban Mobility”, in International Journal On Advances in Systems and Measurements, pp. 128-138, 2012

[7] Louf R., Barthelemy M., “A topology of street patterns”, in Journal of Royal Society Interface, Ausgabe 11, 2014

[8] OpenStreetMap contributors. (2015), http://planet.openstreetmap.org

[9] Statistisches Bundesamt, Zensus 2011, Gebietsstand 31.12.2015

[10] Wuthishuwong C., Trächtler T., “Consensus coordination in the network of Autonomous Intersection Management”, in Informatics in Control 2014, Seiten. 794-801, 2014

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Entwicklung eines Frameworks für neue Fahrerassistenzfunktionen in der Cloud

Dipl.-Ing. **Tom Gothan**, Prof. Dr.-Ing. **Bernard Bäker**,
TU Dresden, Dresden;
Dipl.-Ing. **René Großmann**, Daimler AG, Sindelfingen

Kurzfassung

In einem Kooperationsprojekt zwischen dem Institut für Automobiltechnik (IAD) der Technischen Universität Dresden und der Daimler AG wurde ein Framework zum Speichern, Analysieren und Visualisieren von Flottendaten in der Cloud entwickelt. Auf Basis dieses Framework sollen skalierbare Cloud-Dienste, wie z.B. Fahrerassistenzfunktionen, erforscht werden.

Das Framework wird im Rahmen des Beitrags detailliert vorgestellt. Es beinhaltet die Fahrzeugflotte mit den Kommunikationseinheiten und das Backend mit seinen Teilkomponenten.

Die Arbeit wird in vier Schwerpunkte unterteilt. Zunächst wird die fahrzeugseitige Datenakquise beleuchtet – Welche Fahrzeugdaten werden benötigt? Wie kommen diese Daten ins Backend? Der zweite Schwerpunkt widmet sich der Datenaufbereitung und dem Datenmanagement im Backend – Welche Softwarebausteine sind für den Betrieb eines Backend zur Auswertung von Flottendaten nötig? Wie sieht eine mögliche Datenbankstruktur für das Ablegen von Fahrzeugsignalen aus? Anschließend wird die Integration von verschiedenen Algorithmen in dem Framework betrachtet. Zudem wird die Schnittstelle für die Bereitstellung der gewonnenen Informationen vorgestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1. Einleitung und Motivation

Mit der Einführung des CAN-Bus in den 1980er Jahren [1] begann die Digitalisierung in der bis dahin durch den Maschinenbau geprägten Automobilbranche. Die neuen Kommunikationskanäle in Kombination mit Elektronikkomponenten ermöglichten die Entwicklung von bis dahin nicht realisierbaren Funktionen, z.B. ESP, ACC oder Einparkassistent. Durch den Ausbau des mobilen Internets und die Verbreitung von Cloud-Diensten steht die Automobilindustrie wieder an der Schwelle einer neuen Fahrzeuggeneration, bei der das ehemals in sich geschlossene Ökosystem „Auto“ aufgeweicht und damit selbst Teil eines Netzwerks wird. Die Anbindung einer Fahrzeugflotte an ein Backend ermöglicht die Fusion von Sensorwerten, die bis dahin geographisch unvereinbar waren. Durch die Methoden der modernen Informationsverarbeitung ist es weiterhin möglich, diese Daten zu interpretieren und neue Erkenntnisse bezüglich des Fahrzeugs, des Fahrers und der Umwelt zu gewinnen.

In einem Kooperationsprojekt zwischen dem Institut für Automobiltechnik (IAD) der Technischen Universität Dresden und der Daimler AG wurde ein Framework zum Speichern, Analysieren und Visualisieren von Flottendaten in der Cloud entwickelt. Auf Basis dieses Framework sollen skalierbare Cloud-Dienste, wie z.B. Fahrerassistenzfunktionen, erforscht werden.

Das Framework (siehe Bild 1) besteht aus einer Fahrzeugflotte welche mit Mess-PCs ausgestattet wurde. Diese senden die Fahrzeugdaten über eine mobile Datenverbindung an die Cloud-Umgebung welche wiederum aus mehreren Diensten, unter anderem Skripten und Algorithmen zur Auswertung der Daten, SQL- und NoSQL-Datenbanken sowie einem Webfrontend zur Visualisierung der Ergebnisse besteht. Zusätzlich werden dem Entwickler verschiedene Tools zur Versionierung und Migration des Quellcodes (GitLab) zur Verfügung gestellt.

Die Arbeit wird in vier Schwerpunkte unterteilt. Zunächst wird die fahrzeugseitige Datenakquise beleuchtet – Welche Fahrzeugdaten werden benötigt [2]? Wie kommen diese Daten ins Backend? Der zweite Schwerpunkt widmet sich der Datenaufbereitung und dem Datenmanagement im Backend – Welche Softwarebausteine sind für den Betrieb eines Backend zur Auswertung von Flottendaten nötig? Wie sieht eine mögliche Datenbankstruktur für das Ablegen von Fahrzeugsignalen aus? Anschließend wird die Integration von verschiedenen Algorithmen am Beispiel der Fahrerklassifizierung in dem Framework betrachtet. Im letzten Teil wird die Schnittstelle für die Bereitstellung der gewonnenen Informationen vorgestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

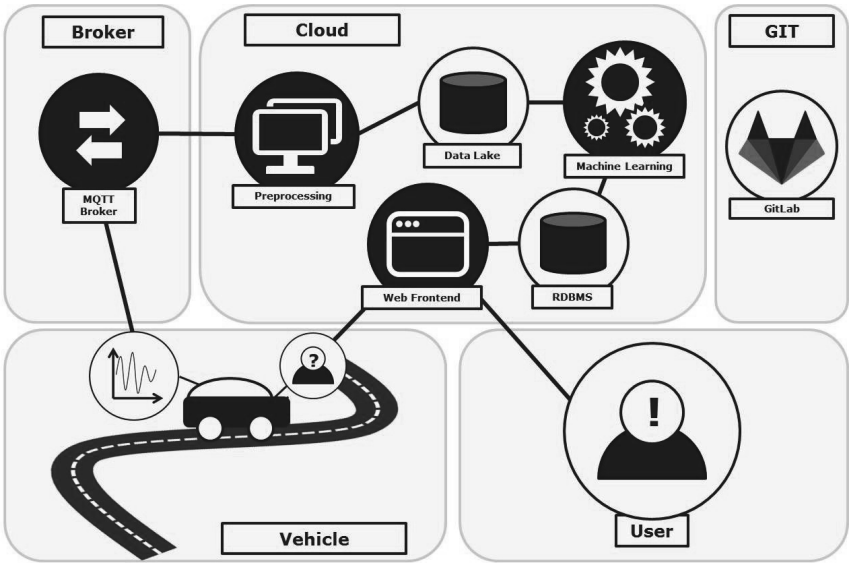


Bild 1: Struktur der Domänen und Teilkomponenten des Frameworks

2. Anforderungskatalog

Bei der Analyse einer geeigneten Cloud-Umgebung ergaben sich mehrere Kernanforderungen bezüglich der Daten:

Flexibilität Zum Zeitpunkt der Entwicklung waren noch nicht alle möglichen Szenarien und Usecases erarbeitet. Das Framework muss daher unkomplizierte Methoden zur Hinzunahme von bis dahin nicht erhobenen Daten liefern.

Genauigkeit Die Daten müssen sowohl Inhaltlich und mathematisch/ physikalisch korrekt gespeichert werden. Dabei sind unter anderem Faktoren wie der Wertebereich, die Formatierung und die Abtastung zu beachten.

Normierung Die Daten müssen zeitlich und örtlich synchronisiert werden um spätere Auswertungen zu vereinfachen.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Vereinheitlichung Die Signale müssen eindeutig beschrieben und benannt werden um eine Zuordbarkeit zwischen verschiedenen Fahrzeugen und Baureihen zu gewährleisten.

Minimalismus Der Datenumfang soll so klein wie möglich ausfallen um Kosten zu verringern und die Übersicht zu gewährleisten. Des Weiteren müssen effektive Datenformate zum Speichern der Daten verwendet werden.

Um die genannten Anforderungen in dem Framework zu vereinen wurden konkrete Grenzen für das System erarbeitet. Zunächst sind innerhalb des Projekts nur Fahrzeugsignale, vornehmlich vom CAN-Bus und vom Flexray, von Interesse. Zum aktuellen Zeitpunkt bestehen auch keine Anforderungen an die Echtzeit. Es muss davon ausgegangen werden dass die Datenpakete auf Grund der eingesetzten mobilen Datenverbindung zwischen Fahrzeug und Backend um mehrere Tage verzögert eintreffen können. Des Weiteren kann nicht ausgeschlossen werden das Datenpakete in chronologischer Reihenfolge eintreffen. Die Bereitstellung der Analyseergebnisse an das Fahrzeug (Rückkanal) sind bereits angedacht, werden in diesem Stadium des Projekts jedoch nicht implementiert.

3. Datenakquise

Eine große Herausforderung bei der Entwicklung des Frameworks bestand in der Auswahl der Daten, der Datenakquise. Zum Zeitpunkt der Entwicklung war nicht abzusehen, welche Signale für die zukünftigen Projekte benötigt werden. Außerdem sollen mögliche Inkonsistenzen bei der Beschreibung der Signale schon bei der Akquise dezimiert werden.

Um einen Großteil der Kernanforderungen abzudecken wurde ein Mechanismus zur einheitlichen Beschreibung der Signale entwickelt. Grundlage dafür sind die Datenbasen der Fahrzeuge beziehungsweise der verschiedenen Baureihen. In diesen Dokumenten sind alle Signale beschrieben, welche bei der Kommunikation zwischen den Steuergeräten auftauchen können. Die Herausforderung ist die Vereinheitlichung der Signalnamen, da teilweise zwischen verschiedenen Baureihen für das gleiche Signal verschiedene Begriffe innerhalb der Dokumente verwendet werden.

Dazu wurde eine Datenbank, das Dictionary (deutsch: Wörterbuch), entwickelt. In dieser Datenbank sind alle für das Projekt relevanten Signale hinterlegt. Das Dictionary besteht aus mehreren Teilen. Zunächst gibt es ein Signalwörterbuch welches alle Signale allgemein beschreibt und ihnen einen eindeutigen Namen zuweist. Ein weiterer Teil ist das Aliaswörterbuch. In diesem sind die Signale mit den Namen aus den Datenbasen für die jeweiligen Bau-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

reihen hinterlegt. Diese Aliassignale sind immer mit einem Signal aus dem Signalwörterbuch verknüpft.
Das Dictionary ist die Grundlage für den Parser der die Fahrzeugdaten in ein einheitliches Format übersetzt. Es wird mit Hilfe eines dafür entwickelten Tools durch die Projektingenieure gepflegt (siehe Bild 2). Dadurch bleibt das Wissen um die Daten beim Fahrzeughersteller.

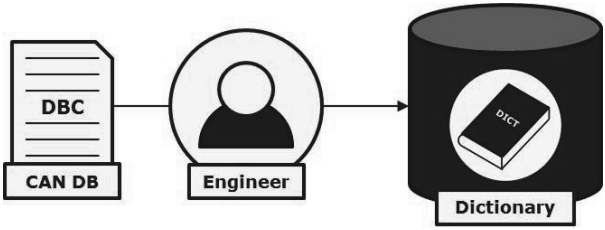


Bild 2: Erstellung des Signalwörterbuchs (Dictionary)

Das Dictionary deckt mehrere der gestellten Anforderungen ab. Zunächst erhalten alle Daten einen einheitlichen Namen. Dies vereinfacht die Automatisierung der Datenverarbeitung und den Austausch der Daten zwischen verschiedenen Projekten. Des Weiteren kann durch das Dictionary die Flexibilität gewährleistet werden. In das Aliaswörterbuch werden nur die für den Entwickler relevanten Signale eingetragen. Dadurch entsteht ein natürlicher Filter, der dynamisch erweitert werden kann, da bei der Datenerhebung nur aus dem Aliaswörterbuch bekannte Signale weiterverarbeitet werden.
Für die Fahrerklassifizierung werden einige aus der Literatur [3] [4] bekannten Signale, unter anderem die Fahrzeuggeschwindigkeit, der Lenkwinkel und die Beschleunigung, verwendet. Des Weiteren soll der Einfluss anderer Signale wie die Fahrzeugklasse, das Wetter, der Straßenzustand und die Tageszeit untersucht werden. Durch die Verwendung des Dictionary bietet das Framework weitreichende Möglichkeiten alle entsprechenden Untersuchungen durchzuführen.

3. Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung beschreibt den Prozess, die im Fahrzeug aufgenommenen Daten zu Filtern, zu Normieren und in ein einheitliches Austauschformat für das Speichern in der Cloud vorzubereiten. Dieser Prozess findet teilweise direkt auf dem Mess-PC im Fahrzeug sowie im Backend durch einen vorgelagerten Softwarebaustein statt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In jedem Fahrzeug der Versuchsflotte wurde ein Mess-PC auf Linux-Basis installiert, welcher direkt an die entsprechenden Bussysteme angeschlossen wurde. Beim Einschalten der Zündung bootet der PC und startet eine Initialisierungsroutine in der das lokale Dictionary mit dem auf dem Server liegenden Dictionary über die mobile Datenverbindung synchronisiert wird. Der Mess-PC verfügt zudem über einen externen GPS-Empfänger der sowohl der Positionsbestimmung sowie der Zeitsynchronisation dient.
Nach der Initialisierung folgt die Datenaufbereitung (siehe Bild 3) welche ausgeführt wird bis das Fahrzeug ausgeschaltet ist. Während dieser Zeit werden alle eingehenden Signale mit Hilfe des Dictionary gefiltert und normiert.

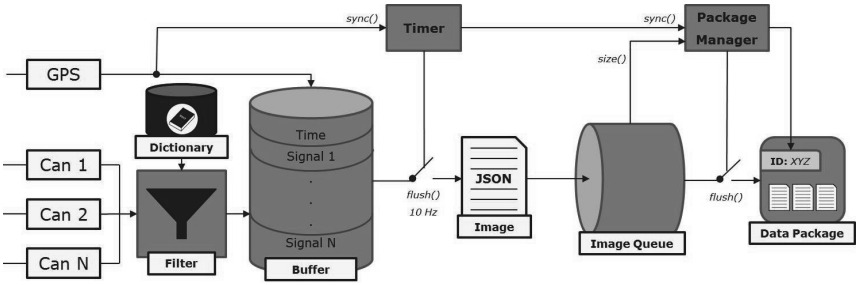


Bild 3: Fahrzeugseitige Datenaufbereitung

Im nächsten Schritt werden die Signale über einen Buffer-Flush zeitlich synchronisiert. Die Funktion ist vergleichbar mit der einer Sample-And-Hold-Schaltung [5, S. 977 ff.]. Zunächst werden alle eingehenden Signale in einen LIFO-Buffer (Last In First Out) gespeichert wobei beim Eintreffen eines bereits im Buffer vorhandenen Signals der letzte bekannte Wert überschrieben wird. Im zeitlichen Abstand von 10Hz wird dieser Buffer ausgelesen (Flush). Die Taktfrequenz basiert auf der Frequenz des eingehenden GPS-Signals welches als Basissignal für die Synchronisation der anderen Signale genutzt wird. Der Vorteil dieser Methode ist, dass alle Signale auf einen bestimmten Ort bezogen werden können wobei die Ortskoordinaten keinem Messfehler unterliegen.
Die beim Auslesen des Buffers enthaltenen Signale sind zeitsynchron und können demensprechend einen gemeinsamen Zeitstempel erhalten. Die durch diesen Prozess erhaltene Momentaufnahme (Snapshot) des Systems wird in das allgemeingültige Datenformat JSON [6]konvertiert (Image). Dieses Datenformat wird verwendet da es offen und plattformunabhängig ist. Zudem ist es sehr flexibel und besitzt einen vergleichsweise geringen Overhead. Durch die Synchronisation mit dem GPS-Signal kann der relative zeitliche Fehler zwischen

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

zwei Images minimiert werden. Außerdem sind die Images äquidistant zueinander was die Verarbeitung der Daten vereinfacht.
Die Images werden in einem FIFO-Buffer (First In First Out) gespeichert um anschließend durch einen Paketmanager zu einem Datenpaket zusammengeführt zu werden. Die Paketgröße kann variabel konfiguriert werden. So kann beispielsweise die Anzahl der Images pro Datenpaket oder der Ablauf einer bestimmten Zeit die Paketgröße beeinflussen.

4. Datenhaltung

Die Datenhaltung beinhaltet die Speicherkonzepte zum Verwalten der Datenpakete welche auf die dynamisch wachsenden Anforderungen reagieren müssen. Jedes Datenpaket enthält eine nicht festgelegte Anzahl von äquidistanten Images die eine unbekannte Anzahl von Signalen enthalten.
Um die Datenpakete zuordnen zu können, ohne der Flexibilität und der Robustheit der Anwendung zu schaden, wurde ein Konzept zur dynamischen Verarbeitung der Daten entwickelt. Dazu wurde festgelegt, dass alle Datenpakete zwischen dem Einschalten und dem Ausschalten der Zündung zu einer Fahrt (Trip) zusammengefasst werden. Daraus folgt das jede Fahrt aus einer endlichen Anzahl an Datenpaketen besteht, welche als Subtrip definiert werden. Die Anzahl der Suptrips pro Fahrt hängt von der Dauer des Trips und der Konfiguration der Datenaufbereitung ab und ist während der Laufzeit unbekannt. Jedem Subtrip wird bei der Erstellung eine eindeutige Trip-ID und die Fahrzeug-ID zugeordnet. Serverseitig können mit Hilfe dieser IDs die Subtrips wiederum einem Trip und einem Fahrzeug zugeordnet werden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Reihenfolge und der zeitliche Versatz der in der Cloud eingehenden Subtrips keine Rolle spielt da diese dynamisch in das bestehende Datenkonstrukt eingefügt werden können. In der **Bild 4** ist ein Trip mit den dazugehörigen Subtrips auf einer Karte dargestellt.
Die Cloud besteht aus mehreren Datendiensten welche für die Datenhaltung zuständig sind (siehe **Bild 5**). Zunächst gibt es einige vorverarbeitende Skripte, welche die Subtrip-Datenpakete von den verschieden Fahrzeugen aus der Flotte entgegennehmen. Unter anderen müssen diese entpackt werden, da sie für den Transport über die mobile Datenverbindung komprimiert wurden. Des Weiteren werden einige Metainformationen extrahiert welche dem Nutzer bei der Suche nach bestimmten Fahrsituationen helfen sollen. Dazu gehört beispielsweise eine grobe örtliche Einordnung oder die Bestimmung der Durchschnittsgeschwindigkeit. Die Metainformationen werden in einer SQL-Datenbank gespeichert. Diese

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

dient als Datenbasis für den Webserver. In dieser Datenbank werden zudem alle Ergebnisse der Analysen gespeichert.

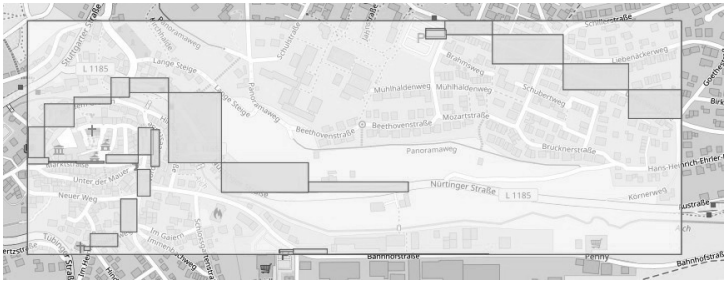


Bild 4: Kartendarstellung eines Trips (blauer Rahmen) mit den dazugehörigen Subtrips (gelbe Rahmen)

Als Datenspeicher für die Subtrip-Datenpakete dient eine NoSQL-Datenbank, im speziellen ein Document-DB. Diese wurde dafür ausgelegt, eine große Menge von JSON-Dokumenten zu verwalten. Die Datenbank dient als Basis für die weiteren Analysen und Dienste. Das Allgemeine Datenformat und die einheitliche Beschreibung der Daten, sowohl mathematisch/ physikalisch sowie Inhaltlich, vereinfachen die Arbeit mit den Daten und ermöglichen eine weitgehende Automatisierung der Datenauswertungen.

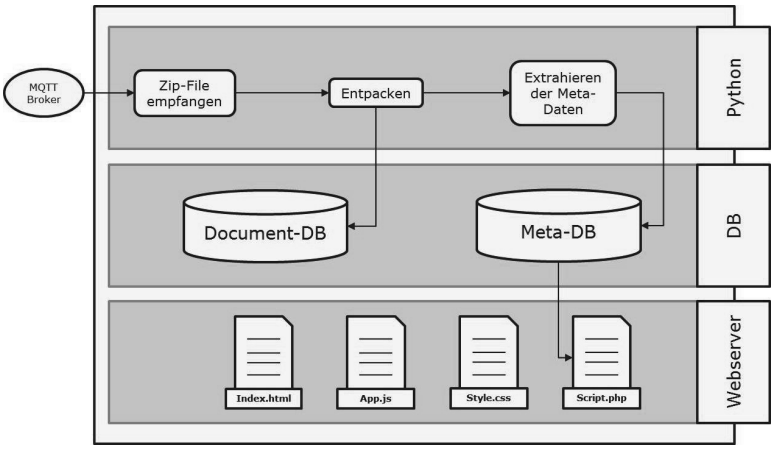


Bild 5: Cloud-Dienste für die Datenhaltung

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

6. Datenanalyse

Die Datenanalyse dient der Generierung neuer fahrzeugbezogener Dienste und Funktionen. Unter anderem wird das Fahrerverhalten auf Basis der Fahrzeugdaten untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen beim Entwurf neuer fahrerspezifischen prädiktiven Assistenzfunktionen einfließen. So können beispielsweise Anhand der Fahrweise das ACC individuell angepasst werden.
Für die Datenanalyse wurden Cloud-Dienste eingerichtet, welche die Rohdaten aus der Document-DB vorkonditionieren. Die Daten werden dazu in einen unabhängigen Bereich (Collection) kopiert, welcher exklusiv für diesen Dienst reserviert wird (siehe **Bild 6**). Zu der Vorkonditionierung können z.B. die Plausibilisierung der Daten, ein Map-Matching oder eine Filterung gehören.

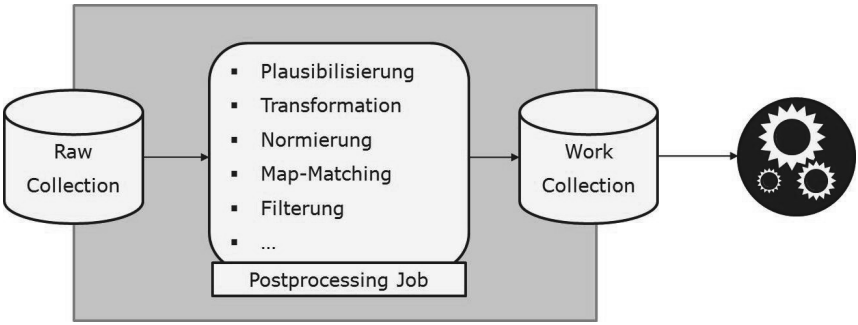


Bild 6: Konditionierung der Daten für die Datenanalyse

7. Fazit und Ausblick

In den nächsten Jahren werden immer mehr Dienste in die Cloud verlagert werden. Der Zugriff auf Fahrzeugdaten aus aller Welt bietet die Möglichkeit neue kundenerlebbare Produkte, wie Assistenzsysteme, autonome Fahrstrategien und Dienste zum Energiemanagement zu generieren. Aktuell werden jedoch sehr produktspezifische Dienste erarbeitet. Im Kooperationsprojekt mit Daimler wurde eine allgemeine Plattform entwickelt, welche als Basis für viele neue Entwicklungen dient [7]. Kern des Konzepts ist ein einheitliches, skalierbares und fle-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

xibles Speicherkonzept sowie eine skalierbare Softwareumgebung zur Erprobung neuer Algorithmen.

8. Quellen

[1] W. Zimmermann und R. Schmidgall, *Bussysteme in der Fahrzeugtechnik: Protokolle, Standards und Softwarearchitektur ; mit 103 Tabellen*, 5., Aktualisierte und Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.

[2] F. Küçükay und T. Kassel, „Anforderungsoptimierung für Getriebe und Komponenten“, *ATZ - Automob. Z.*, Bd. 109, Nr. 9, S. 812–819, Sep. 2007.

[3] E. Mehrjerdian, „Potenziale einer Lenkmomentenempfehlung unter fahrdynamischen Gesichtspunkten“, TU Dortmund, 2015.

[4] P. Held, „Schätzen verdeckter Fahrereigenschaften auf Basis des Fahrverhaltens“, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2011.

[5] U. Tietze, C. Schenk, und E. Gamm, *Halbleiter-Schaltungstechnik: [neuer Teil: nachrichtentechnische Schaltungen]*, 12. Aufl. Berlin: Springer, 2002.

[6] „ECMA-404: The JSON Data Interchange Format“. ECMA International, 2013.

[7] R. Großmann, T. Gothan, und B. Bäker, „Adaption des Fahrerverhaltens in Abhängigkeit der Fahrsi-tuation durch intelligente Fahrstrategien“ Diese Ausgabe.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Lokalisierung und Bewegungsprädiktion für vernetzte Fahrzeuge an städtischen Kreuzungen

M.Sc. **Christian-Eike Framing**, M.Sc. **Tobias Quack**,
Dr.-Ing. **Frank-Josef Heßeler,** Prof. Dr.-Ing. **Dirk Abel**,
Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen

Kurzfassung

Zukünftige Fahrerassistenzsysteme zum Einsatz im innerstädtischen Bereich erfordern eine präzise und vollständige Wahrnehmung über die Bewegungen der Verkehrsteilnehmer im Fahrzeugumfeld. Die alleinige Verwendung von fahrzeugeigenen Sensoren ist wenig redundant und wird bei Objektverdeckungen vor Probleme gestellt. Ein Lösungsansatz ist die Fusion von Sensordaten der Verkehrsteilnehmer mit denen von Infrastruktursensoren. Im vorliegenden Beitrag werden zu diesem Zweck zwei Algorithmen vorgestellt, die für den Einsatz an einer innerstädtischen Kreuzung konzipiert sind. Der Sensorfusionsalgorithmus ist in der Lage aus den Daten unterschiedlicher Sensoren ein Gesamtbild der aktuellen Positionen aller vorhandenen Verkehrsteilnehmer zu schätzen. Dazu werden je nach Verkehrsteilnehmer angepasste Bewegungsmodelle verwendet. Zudem wird ein Konzept zur Prädiktion längerfristiger Bewegungen von Fahrzeugen im Kreuzungsbereich vorgestellt. Das Konzept lässt sowohl die Prädiktion von Spurwechseln als auch Abbiegemanövern zu.

1. Einleitung

Im Fokus der Forschung stand in den letzten Jahren verstärkt das Automatisierte Fahren. In der höchsten Automatisierungsstufe, dem „Vollautomatisierten Fahren“, übernimmt das Fahrzeug dabei vollständig die Fahraufgabe und der Fahrer kann sich anderen Tätigkeiten zuwenden. Eines der dabei verfolgten Ziele liegt in der gesteigerten Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer und dem Komfort der Insassen. Außerdem kann mit einer automatisierten Fahrzeugführung eine besonders energieeffiziente Fahrweise erreicht werden. Voraussetzung zur Umsetzung ist eine vollständige Wahrnehmung des aktuellen Fahrzeugumfeldes, auf deren Basis die Algorithmen potentiell sicherheitskritische Fahrentscheidungen treffen. Als Randbedingung für eine Fahrtplanung ist darüber hinaus eine Abschätzung der zukünftigen Bewegungen aller Verkehrsteilnehmer erforderlich. Die Umgebungswahrnehmung basiert üblicherweise auf fest im Fahrzeug verbauten Sensoren und deckt damit nur den direkten Bereich um das Fahrzeug herum ab. Im innerstädtischen Bereich ist die Umgebung je-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

doch typischerweise eng bebaut und unstrukturiert. Gerade die Sicht auf Fußgänger als VRUs (Vulnerable Road Users) ist oft durch parkende Fahrzeuge verdeckt. Die Wahrnehmung der Umgebung kann daher nicht ausschließlich auf den Daten der Fahrzeugsensoren beruhen.

Mit dem Projekt „I2EASE“ verfolgt ein Konsortium aus Forschern der RWTH Aachen gemeinsam mit Industriepartnern aus den Bereichen der intelligenten Verkehrssysteme und der Elektromobilität das Ziel, energieeffizientes und sicheres automatisiertes Fahren in städtischen Kreuzungen zu realisieren. Im Fokus stehen hierbei insbesondere Elektrofahrzeuge, deren spezifische Anforderungen an moderne Verkehrssysteme besondere Aufmerksamkeit erfordern. Ein wesentlicher Ansatz des Projektes besteht darin, Verkehrsteilnehmer und Verkehrsinfrastruktur lokal zu vernetzen, um Status- und Sensorinformationen auszutauschen und damit eine möglichst optimale Koordination des Verkehrsgeschehens zu ermöglichen.

Im ersten Teil dieses Beitrags wird der Versuchsaufbau einer innerstädtischen Kreuzung mit vernetzter Sensorik beschrieben. Die Methodik zur Lokalisierung aller Verkehrsteilnehmer an der Kreuzung wird anschließend in Form eines Sensorfusionsalgorithmus vorgestellt. Daran anknüpfend wird schließlich eine Methode zur Prädiktion zukünftiger Fahrzeugbewegungen an der Kreuzung erläutert.

2. Versuchsaufbau

Für die systematische und reproduzierbare Durchführung von Versuchen wird im Rahmen des Projekts I2EASE eine Testkreuzung auf dem Gelände des Aldenhoven Testing Centers der RWTH Aachen genutzt [1]. Die Kreuzung besitzt vier Kreuzungsarme, die jeweils Platz für drei reguläre Fahrstreifen sowie zwei für Radfahrer bieten. Der Verkehr an der Kreuzung wird durch eine Lichtsignalanlage geregelt, die auch Fußgängerüberwege vorsieht. Entlang der Straße und an der Kreuzung selbst stehen Straßenleuchten, die außer zur Beleuchtung auch als Träger für Sensoren im Projekt Verwendung finden.

Zur Vernetzung steht auf dem Testgelände Kommunikationsinfrastruktur nach dem Standard 802.11p (ITS G5) zur Verfügung. Vernetzte Fahrzeuge führen eine Kommunikationseinheit mit sich, die zum einen den Informationsaustausch mit anderen Fahrzeugen (V2V) und zum anderen mit der Infrastruktur (V2I) erlaubt. Dazu wird ein lokales Netz durch mehrere Road Side Units (RSU) aufgespannt [2]. Fußgänger und Radfahrer mit tragbaren Mobilgeräten können ebenfalls über ein kabelloses Netzwerk des Standards 802.11ac eingebunden werden. Als alternativer Kommunikationsstandard ist aktuell auch die Implementierung des 5G-Mobilfunkstandards in Vorbereitung.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Als Teil der intelligenten Verkehrsinfrastruktur werden an der Kreuzung verschiedene Sensorsysteme in das Kommunikationsnetz eingebunden (Abbildung 1). Der innere Kreuzungsbereich lässt sich mit einem mobilen System aus vier IBEO-Lux Laserscannern erfassen. Es wird an gewünschter Stelle der Kreuzung platziert und dient als Referenz zur Lokalisierung der Verkehrsteilnehmer. Entlang der eingehenden Kreuzungsarme werden Kameras und Ultraschallsensoren montiert, die Objektdaten über das Kommunikationsnetz zur Verfügung stellen. Der Zustand der Lichtsignalanlage (LSA) ist auslesbar. Umgekehrt können sowohl die Schaltung der LSA als auch die Lichtintensität der Straßenleuchten beeinflusst werden.

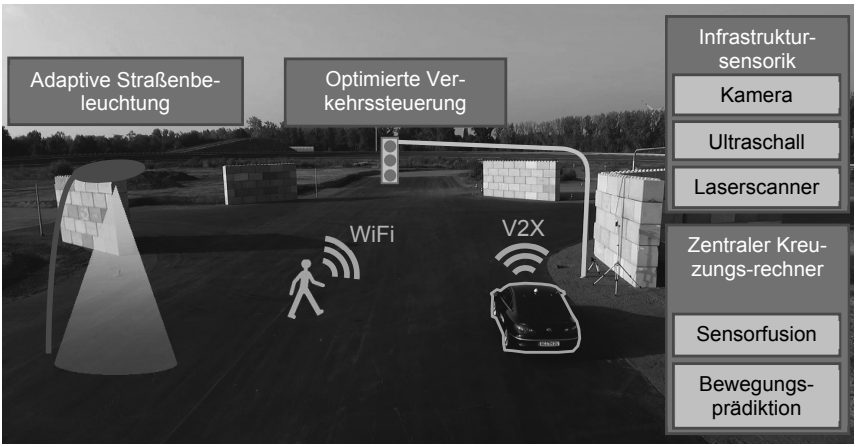


Bild 1: Schematische Darstellung der intelligenten Verkehrsinfrastruktur an der Testkreuzung im Projekt „I2EASE“

In der vorliegenden Arbeit wird die Erfassung von Verkehrsteilnehmern an der Kreuzung mit PKWs und Fußgängern untersucht, die je nach verbauter Sensorik unterschiedliche Informationen zur Verfügung stellen. Die Fahrzeuge werden eingeteilt in solche mit menschlichem Fahrer und solche, die automatisiert die Kreuzung überqueren. Die Fahrzeuge mit menschlichen Fahrern sind mit GNSS-Empfängern ausgestattet und senden ihre Position und Geschwindigkeit. Die automatisierten Fahrzeuge verfügen zusätzlich über LiDAR-, Radar- und Kamerasensoren zur Umfeldwahrnehmung sowie eine tiefere Integration in die Fahrzeugsensorik. Neben einem detaillierten Fahrzeugzustand sind damit auch Informationen über im Umfeld erkannte Objekte zugänglich. Die Fußgänger an der Kreuzung tragen jeweils ein Smartphone mit sich, das mit dem verbauten Standard-GNSS-Empfänger die Positionen

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

bestimmt. Zusätzlich kann jeder Verkehrsteilnehmer mit einem von zwei tragbaren hochgenauen GNSS-Empfängern als Referenz zur Validierung ausgestattet werden.

Der Informationsaustausch zwischen den Sensoren und den Verkehrsteilnehmern geschieht mithilfe eines modularen Systems, das auf der Middleware „Robot Operating System“ (ROS) basiert. Jeder Netzteilnehmer stellt einen Knoten im Netzwerk dar, der nach Anmeldung an zentraler Stelle auf vorgesehenen Kanälen Nachrichten senden und empfangen kann. Die flexible Vernetzung erlaubt einen robusten Betrieb während stetig neue Verkehrsteilnehmer hinzukommen und andere den Bereich verlassen. Lokal ist ein zentraler Kreuzungsrechner (CIC) installiert, der für die Verwaltung der Netzteilnehmer zuständig ist und Rechenleistung zur Verfügung stellt. Hier werden auch die Algorithmen zur Lokalisierung der Verkehrsteilnehmer, zur Bewegungsprädiktion und darauf aufsetzende Anwendungen ausgeführt. Die anfallenden Sensordaten und die fusionierten Informationen können in einer eigens entwickelten Benutzeroberfläche über einer Karte der Kreuzung visualisiert werden.

3. Lokalisierung

Mit der zentralen Erfassung von Sensorinformationen – sowohl von infrastrukturseitiger Sensorik, als auch als Statusinformationen von Verkehrsteilnehmern – wird es möglich, Verkehrsteilnehmer im Kreuzungsbereich robust und präzise zu lokalisieren und ein zuverlässiges und vollständiges Abbild der Verkehrssituation abzuleiten. Voraussetzung hierfür ist die Fusion der bereit gestellten Sensordaten in Echtzeit. Diese Aufgabenstellung beschreibt ein „Multiple Object Tracking“-Problem mit unbekannter Anzahl an Objekten, bei dem die Zuordnung zwischen Messdaten und beobachteten Objekten unbekannt ist [3].

Aufgrund der Vielzahl möglicher Sensoren und Verkehrsteilnehmer wird eine einheitliche Schnittstelle zum Informationsaustausch verwendet. Statt Rohdaten der Sensoren werden stets nur Objektdaten gesendet. Sie enthalten die folgenden Felder:

- Identifikationsnummer (ID)
- Zeitstempel der Messung und des Nachrichtenversands
- Objektklasse (z.B. Fußgänger) *
- Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung *
- Orientierung *
- Äußere Abmessungen *

Die Positionen der Objekte beziehen sich auf ein kreuzungsfestes kartesisches Koordinatensystem. Bei Sensoren wird zwischen solchen unterschieden, die ihr Umfeld wahrnehmen, und solchen, die Teil eines Objektes sind und somit Informationen über den eigenen Status

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

zur Verfügung stellen. Sensoren, die ihr Umfeld wahrnehmen – wie beispielsweise der stationäre Laserscanner – senden eine Liste der erkannten Objekte zusammen mit einer Einschätzung der Unsicherheit für die mit Stern (*) markierten Felder. Bei Vektorgrößen wird diese Unsicherheit als Kovarianzmatrix hinterlegt. Sie wird maßgeblich durch das Messprinzip des Sensors bestimmt.

Jeder Sensor ordnet einem im Umfeld erkannten Objekt eine lokal eindeutige ID zu. Ein einziges Objekt kann jedoch von unterschiedlichen Sensoren mit verschiedenen lokalen IDs markiert werden. Selbstidentifizierende Sensoren – beispielsweise das Smartphone eines Fußgängers – dagegen liefern eine gleichbleibende feste ID und ihren direkt gemessenen Zustand. Es kann daher mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass es sich um eine Messung eines tatsächlichen Objekts handelt.

Aus einer Konstellation von Verkehrsteilnehmern an der Kreuzung generieren die vorgestellten Sensoren mitunter sehr unterschiedliche Objektdaten. Um ein Gesamtbild zu rekonstruieren, müssen die Informationen zusammengeführt werden. In jedem Zeitschritt der Sensorfusion geschieht dafür zunächst eine Zuordnung der Sensormessungen, bevor die Positionen der beobachteten Objekte geschätzt werden.

3.1 Datenzuordnung

Im Betrieb an der Kreuzung werden innerhalb kurzer Zeit Messungen verschiedener Sensoren empfangen. Für jede Messung eines Sensors über ein erkanntes Objekt muss das Problem der Datenzuordnung geklärt werden, das über die weitere Verarbeitung der Messung entscheidet. Als Beispiel könnte es sein, dass ein Verkehrsteilnehmer erstmalig von einem Sensor erkannt wird, aber bereits zuvor selbst Statusinformationen gesendet hat und der Sensorfusion damit bereits bekannt ist. In diesem Fall müssen beide Messungen zusammen verarbeitet werden. Zu diesem Zweck wird intern eine Liste über beobachtete Objekte und entsprechend zugeordnete Messwerte geführt. Ein Messwert kann von der Sensorfusion auf vier verschiedene Arten verarbeitet werden:

1. Zuordnen zu einem bereits beobachteten Verkehrsteilnehmer
2. Registrierung eines neuen Verkehrsteilnehmers
3. Verwerfen der Messung
4. Split/Merge

Ein Split-Vorgang stellt den Fall dar, dass Messungen aus zwei Sensoren zunächst einem einzigen Objekt zugeordnet werden, sich anschließend jedoch in zwei Objekte aufteilen. Dies kann dann auftreten, wenn zwei Verkehrsteilnehmer zunächst fälschlicherweise als ein ein-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

ziger erkannt werden. Auch ohne Falschzuordnung kann es dazu kommen, wenn beispielsweise ein Fußgänger aus einem Fahrzeug aussteigt und sich damit zwei getrennt zu beobachtende Verkehrsteilnehmer ergeben. Der umgekehrte Fall der Vereinigung zweier Objekte wird als Merge-Vorgang bezeichnet.

Die Entscheidung über die Zuordnung einer Messung zu einem beobachteten Objekt wird auf Basis der Bhattacharyya-Distanz getroffen [4]. Sie bezieht neben der euklidischen Dis-

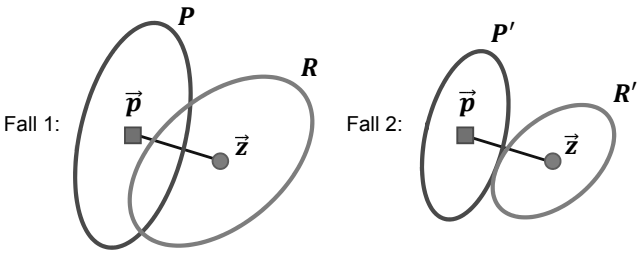


Bild 1: Position eines beobachteten Objekts $\vec{p}$ und eines neuen Sensormesswerts $\vec{z}$ mit den Kovarianzen $\boldsymbol{P}, \boldsymbol{R}$ bzw. $\boldsymbol{P}', \boldsymbol{R}'$

tanz der Objekte die geschätzte Unsicherheit des Sensormesswerts und des Objektzustands mit ein. Für jeden neuen Messwert wird diese Distanz in Kombination mit jedem bereits beobachteten Objekt berechnet. Eine Zuordnung ist dann gegeben, wenn die Distanz einen festgelegten Grenzwert unterschreitet. Dieser Grenzwert stellt einen wichtigen Parameter des Algorithmus dar und muss experimentell ausgelegt werden. Ein Beispiel für eine Datenzuordnung ist in Abbildung 2 gegeben. Dargestellt sind die Positionen eines bekannten Objekts $\vec{p} = [p_x, p_y]^T$ und eines Sensormesswerts $\vec{z} = [z_x, z_y]^T$ zusammen mit den entsprechenden Kovarianzellipsen $\boldsymbol{P}$ und $\boldsymbol{R}$ in Fall 1 und $\boldsymbol{P}'$ und $\boldsymbol{R}'$ in Fall 2. In beiden Fällen weisen $\vec{p}$ und $\vec{z}$ den gleichen euklidischen Abstand $\|\vec{p} - \vec{z}\|$ auf. In Fall 2 sind jedoch kleinere Kovarianzellipsen mit den Positionswerten verknüpft. Sowohl die geschätzte Objektposition als auch der Messwert sind also mit höherer Sicherheit bekannt. In Fall 1 wird der Messwert – ein entsprechender Grenzwert für die Bhattacharyya-Distanz vorausgesetzt – daher dem bekannten Objekt zugeordnet, während in Fall 2 ein neues Objekt in die Beobachtung mit aufgenommen wird.

Damit einzelne fehlerhafte Messungen nicht jeweils zu neuen Objekten führen, wird ein neu beobachtetes Objekt zunächst als unbestätigt angesehen. Erst nachdem eine Mindestanzahl an Messungen dem Objekt innerhalb eines Zeitrahmens zugeordnet wurden, wird es als be-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

stätigt angesehen und ausgegeben. Umgekehrt werden beobachtete Objekte verworfen, wenn ihnen innerhalb eines Zeitrahmens keine Messung zugeordnet werden kann oder die Unsicherheit des Objektzustands einen Grenzwert überschreitet.

3.2 Filterung

Der zweite Schritt nach der Zuordnung der Messwerte ist die Filterung des Objektzustands. Hierfür kommt ein zeitdiskretes Extended Kalman Filter (EKF) nach der Formulierung von [5] zum Einsatz, das unter Berücksichtigung der vorliegenden Messunsicherheiten in jedem Zeitschritt eine optimale Schätzung der Objektpositionen vornimmt. Ein wesentlicher Teil der Auslegung des EKF ist die Wahl eines geeigneten Prozessmodells und der damit geschätzten Zustände. Der Prozess stellt in diesem Fall die Bewegung der Verkehrsteilnehmer dar, deren Dynamik sich stark unterscheiden kann. Es werden daher je nach Typ des Verkehrsteilnehmers angepasste Modelle genutzt [6].

Für Fahrzeuge – darunter fallen PKW, LKW, Busse, Motorräder und Fahrradfahrer – werden die fünf Zustände Position x, Position y, Geschwindigkeit v, Gierwinkel ψ und Gierrate $\dot{\psi}$ geschätzt. Für den Prädiktionsschritt wird ein Modell angenommen, das die Kinematik von Ein- und Mehrspurfahrzeugen berücksichtigt. Es wird angenommen, dass sich das Objekt mit konstanter Geschwindigkeit v in Richtung ψ fortbewegt. Der Gierwinkel ψ wird aus dem Integral der konstant angenommenen Gierrate $\dot{\psi}$ bestimmt. Der Prädiktionsschritt mithilfe dieses Modells wird nichtlinear ausgeführt.

Im Gegensatz zu Fahrzeugen können Fußgänger sich unabhängig von ihrer Orientierung in alle Richtungen bewegen. Die Ausrichtung wird daher als Zustand weggelassen und es bleiben die Zustände Position x, Position y sowie die Geschwindigkeit in x-Richtung v_x und y-Richtung v_y. Im nichtlinearen Prädiktionsschritt wird die zuletzt geschätzte Position in Richtung des geschätzten Geschwindigkeitsvektors mit der Sample-Zeit T_S nach vorne projiziert. Der anschließende Korrekturschritt wird nacheinander mit den zugeordneten Messwerten durchgeführt und ist für beide Modelle trivial, da die Zustände der Position und Geschwindigkeit direkt gemessen werden.

Die zwei Schritte des EKF werden für jedes beobachtete Objekt einzeln vorgenommen und führen in der Summe zu einem aktuellen Gesamtbild der Verkehrsteilnehmer an der Kreuzung. Auf Basis dieser Daten lässt sich eine Verkehrsbeobachtung durchführen und die Art und das Verhalten der Verkehrsteilnehmer statistisch auswerten. Insbesondere im Rahmen weitergehender Assistenzsysteme für automatisierte Fahrfunktionen und ein intelligentes Verkehrsmanagement wird darüber hinaus eine Schätzung der zukünftigen Bewegungen

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

aller Verkehrsteilnehmer benötigt. Im Folgenden wird ein Konzept speziell für die Prädiktion von Fahrzeugbewegungen an der Kreuzung vorgestellt.

4. Bewegungsprädiktion für Fahrzeuge

Die zentrale Bewegungsprädiktion an der Kreuzung hat die Aufgabe für einen längeren Zeithorizont eine Schätzung über die zukünftigen Bewegungen aller beobachteten Fahrzeuge bereitzustellen. Insbesondere für Fahrzeuge mit menschlichem Fahrer ist von Interesse, welches Fahrmanöver kurzfristig beabsichtigt wird und welche Trajektorie das Fahrzeug dabei zurücklegen wird.

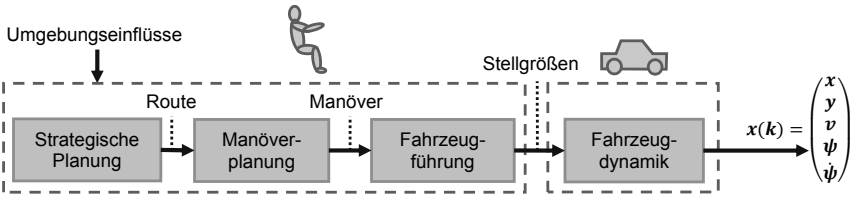


Bild 3: Fahrermodell nach [7] erweitert um Teil der Fahrzeugdynamik

4.1 Modellvorstellung

Aus regelungstechnischer Sicht stellt die Fahrzeugführung durch einen Menschen einen Prozess mit Ein- und Ausgangsgrößen dar, für den es ein Ersatzmodell zu finden gilt. Da der Prozess vornehmlich durch kognitive Prozesse bestimmt wird, gestaltet sich eine Modellierung allein durch physikalische Gleichungen als schwierig. Als Modellvorstellung kann ein hierarchisches Modell nach [7] verwendet werden (Abbildung 3). Nach dem Modell findet auf oberster Ebene eine strategische Fahrtplanung statt, die eine beabsichtigte Route zum Ergebnis hat. Anschließend wird ein Fahrmanöver ausgewählt, das kurzfristig zum Erreichen der Zielroute führt. Dieses Fahrmanöver stellt die erste Zielgröße des Algorithmus dar und wird als kategorische Variable angesehen. In dieser Arbeit wird zwischen folgenden Manövern unterschieden, die vor allem die Querdynamik des Fahrzeugs beeinflussen:

- Aktuelle Spur halten
- Spurwechsel nach links/rechts
- Abbiegevorgang nach links/rechts

Beeinflusst wird die Wahl durch die lokale Straßenführung sowie durch mögliche Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmern. In der Fahrzeugführung wird das gewählte Fahrmanöver schließlich durch Vorgabe des Lenkwinkels und der Beschleunigung an das Fahrzeug umgesetzt. Diese Ebene entspricht in einem automatisierten Fahrzeug dem Längs- und Quer-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

regler. Das Fahrzeug bewegt sich als Folge der Stellgrößen schließlich entlang einer definierten Trajektorie. Sie stellt die zweite Zielgröße des Prädiktionsalgorithmus dar.

Nach [8] können aktuelle Ansätze der Bewegungsprädiktion in drei Kategorien eingeteilt werden. *Physikalische Modelle* entstammen der direkten Beschreibung der Fahrzeugkinematik und vernachlässigen gänzlich den Fahrereinfluss. Solche Modelle sind für einen kurzen Prädiktionshorizont präzise und werden daher auch im Prädiktionsschritt des EKF in der Sensorfusion eingesetzt. Über längere Zeiträume wird die Fahrzeugbewegung jedoch maßgeblich durch die sich ändernden Steuereingaben des Fahrers beeinflusst. Die *manöverbasierten Modelle* tragen dem Fahrereinfluss Rechnung und schätzen zunächst das aktuelle Fahrmanöver, um daraus die Fahrzeugtrajektorie abzuleiten. *Interaktionsbasierte Modelle* beziehen darüber hinaus die Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern mit in die Prädiktion ein. Das vorgestellte Konzept zur Prädiktion der Fahrzeugbewegungen ist den manöverbasierten Modellen zuzuordnen. Die Eingangsgrößen des Algorithmus sind die zuletzt geschätzten Fahrzeugpositionen sowie eine digitale Karte der Kreuzung.

4.2 Konzept

Im Rahmen des Projekts steht eine digitale Karte der Kreuzung zur Verfügung. Das Beschreibungsformat basiert auf dem offen verfügbaren Openstreetmap-Standard. Neben dem Standort von stationären Sensoren und Gebäuden enthält die Karte den Verlauf der Fahrstreifen an der Kreuzung. Es ist jeweils der Verlauf der Mittellinie als Abfolge von Liniensegmenten, und diese als Reihe von geographischen Koordinaten abgespeichert. Aufeinander folgende Streckenstücke sind durch Verbindungspunkte miteinander verknüpft. Die Vorgehensweise des Algorithmus wird anhand des Beispiels in Abbildung 4 erläutert.

Im Beispiel nähert sich ein Fahrzeug der Kreuzung. Auf der aktuell befahrenen Spur ist entweder die Geradeausfahrt oder ein Rechtsabbiegevorgang möglich. Ausgehend von diesem Zeitpunkt wird ein Berechnungszeitschritt des Prädiktionsalgorithmus durchgeführt. Es stehen die zuletzt von der Sensorfusion bestimmte Position $\vec{\boldsymbol{p}}(t_0) = [x_0, y_0]$, Geschwindigkeit v_0 und Beschleunigung a_0 des Fahrzeugs zur Verfügung. Dieser Zeitpunkt stellt den ersten Zeitschritt t_0 der zu bestimmenden Trajektorie dar. Das Ziel ist die Bestimmung der Fahrzeugtrajektorie $\vec{\boldsymbol{p}}(t)$ für den Zeitraum $t \in [t_0, t_0 + T_p]$. Der Prädiktionshorizont T_p muss ausreichend groß gewählt werden, sodass ein Fahrmanöver darin komplett abgeschlossen werden kann. Nach [9] wird ein Spurwechsel in etwa 6 Sekunden abgeschlossen. $T_p = 6s$ kann daher als erster Referenzwert herangezogen werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

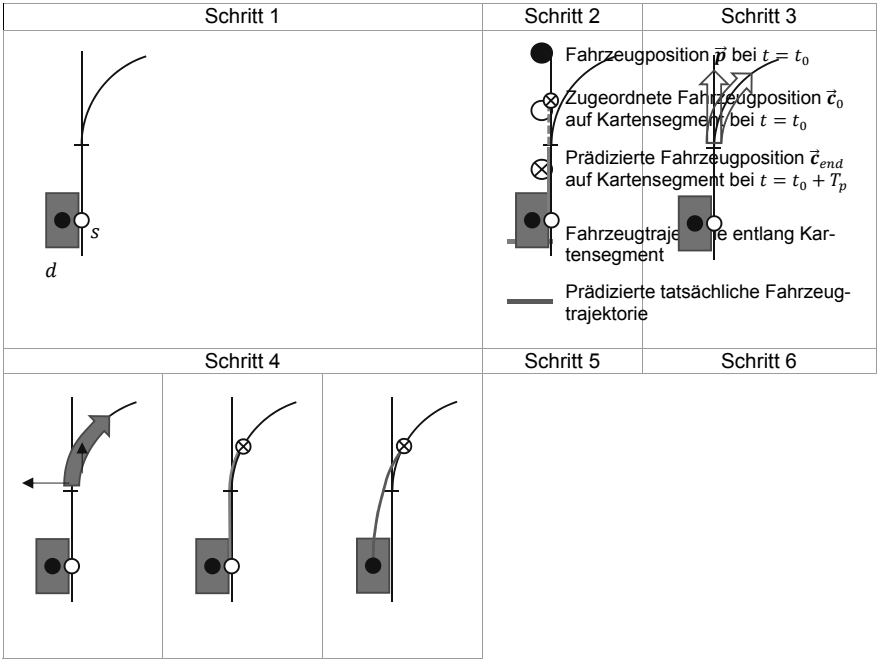


Bild 4: Schematische Darstellung des schrittweisen Vorgehens zur Prädiktion des Fahrmanövers und der Fahrzeugtrajektorie

werden. Eine solche Zuordnung geschieht mittels eines Map-Matching-Verfahrens. Ein dafür gängiges Verfahren berechnet aus den letzten Positionen des Fahrzeugs die Trajektorie sowie einen Zeitverlauf für den Fahrzeugwinkel und die Pfadkrümmung. Für jedes Kartensegment in der Karte werden ebenfalls die entsprechenden Verläufe berechnet. Mithilfe einer Kreuzkorrelation kann die Ähnlichkeit zwischen den Verläufen und damit das am wahrscheinlichsten befahrene Kartenstück bestimmt werden. Heraus kommt eine Zuordnung zu einem Kartensegment sowie eine zugeordnete Position $\vec{c}_0 = [s_0, 0]$ auf dem Fahrstreifen. Sie ist definiert durch die Nummer des befahrenen Kartenstücks, einer vom Anfangspunkt des Kartenstücks gemessenen Bogenlänge s sowie einem Querabstand von $d_0 = 0$.

In Schritt 2 wird ermittelt welche Folgekartensegmente innerhalb des Prädiktionshorizonts vom Fahrzeug erreichbar sind. Ausgehend von der zum Zeitpunkt t_0 zugeordneten Position $\vec{c}_0$ auf dem Kartenstück wird die Endposition

$$\vec{c}_{end} = \vec{c}(t_0 + T_p) = \left[s_0 + v_0 \cdot T_p + \frac{1}{2} \cdot a_0 \cdot T_p^2, 0\right]$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

berechnet, die das Fahrzeug mit der aktuellen Geschwindigkeit v_0 und konstanter Beschleunigung a_0 am Ende des Prädiktionshorizonts erreichen würde. Unterschreitet die Bogenlänge zwischen $\vec{c}_0$ und $\vec{c}_{end}$ bei langsamer Fahrzeuggeschwindigkeit einen Mindestwert, wird stattdessen eine feste Distanz gewählt, um eine Mindestvorausschau zu ermöglichen. Liegen zwischen $\vec{c}_0$ und $\vec{c}_{end}$ abzweigende Fahrstreifen, werden diese als mögliche Folgekartenabschnitte zwischengespeichert. Die Art der Fahrmanöver, die beim Übergang vom Ursprungs- zu den jeweiligen Folgekartenabschnitten durchgeführt wird, ist in den Kartenattributen hinterlegt und wird in Schritt 3 ausgelesen. Wenn zwischen $\vec{c}_0$ und $\vec{c}_{end}$ keine Abzweigungen vorhanden sind, muss zusätzlich geprüft werden, ob ein benachbarter Fahrstreifen existiert, also ein Spurwechsel möglich ist. Ist auch das nicht der Fall, kann direkt zu Schritt 6 übergegangen werden.

Für ein beobachtetes Fahrzeug sind nun die möglichen Fahrmanöver bekannt, die es innerhalb des Prädiktionshorizonts durchführen kann. Mithilfe der bekannten Kombination kann in Schritt 4 ein Maschinenlernmodell dazu verwendet werden, das wahrscheinlichste Fahrmanöver zu schätzen. Für Spurwechsel oder Abbiegevorgänge lassen sich jeweils spezialisierte Modelle mit entsprechenden aufgezeichneten Fahrzeugtrajektorien trainieren. Die Bestimmung des wahrscheinlichsten Manövers aus einer Auswahl entspricht einem Klassifikationsproblem. Ein Fahrmanöver kann anhand einer charakteristischen Abfolge von Fahrzeugzuständen erkannt werden. Weitere Merkmale sind der Querabstand zum Fahrstreifen und die vorhergesagte Geschwindigkeit am Abzweigungspunkt. Für eine solche Problemstruktur eignet sich der Einsatz von Hidden Markov Models [9].

Aus dem wahrscheinlichsten Fahrmanöver folgt direkt das Folgesegment. Nach der Methode aus Schritt 2 wird in Schritt 5 ein neuer Endpunkt $\vec{c}_{end}$ berechnet. Unter der Annahme, dass das Fahrzeug zum Ende des Zeithorizonts auf der Fahrstreifenmitte fährt, entspricht die Transformation von $\vec{c}_{end}$ in kartesische Koordinaten $\vec{p}(t_0 + T_p)$ dem Endpunkt der Trajektorie. Zwischen $\vec{p}(t_0)$ und $\vec{p}(t_0 + T_p)$ kann im anschließenden Schritt 6 ein Polynom gefittet werden. Dabei gilt es entsprechend der komfortorientierten Fahrweise eines Menschen den in der Trajektorie auftretenden Ruck in Querrichtung zu minimieren [11]. Das Ergebnis ist eine kontinuierliche Trajektorie $\vec{p}(t)$ für den Prädiktionszeitraum $t \in [t_0, t_0 + T_p]$. Sie wird anschließend in äquidistanten Zeitschritten diskretisiert und abgespeichert.

Die zwei Zielgrößen, das geschätzte Fahrmanöver und die prädizierte Trajektorie, werden anschließend zusammen mit der ID des beobachteten Objekts in ein angepasstes Nachrichtenobjekt gepackt und anderen Knoten im Netzwerk zur Verfügung gestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Ausblick

Die vorliegenden Konzepte zur Sensorfusion und Bewegungsprädiktion werden derzeit für die Verwendung an der Testkreuzung implementiert. Im Rahmen einer umfangreichen Messkampagne ist die Aufzeichnung von Daten aller vorgestellten Sensoren geplant. Mithilfe der Daten wird eine optimierte Parametrierung des Algorithmus zur Sensorfusion angestrebt. Für den Algorithmus zur Bewegungsprädiktion müssen entsprechende Trainings- und Validierungsdaten aufbereitet werden. Aufbauend auf den ermittelten Bewegungen der Verkehrsteilnehmer an der Kreuzung kann schließlich eine Umsetzung energieeffizienter und sicherheitsrelevanter Fahrfunktionen erfolgen.

6. Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts I2EASE.

7. Literaturverzeichnis

[1] Engelhardt, T.; Rütters, R.; Katriniok, A.; Abel, D.: automotiveGATE und railGATE, Testgebiete für Galileo-basierte Fahrzeugführung auf Schiene und Straße. Automation 2011 – Kongress VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, Baden-Baden, Deutschland, 2011

[2] Themann, P.; Raudszus, D.; Eckstein, L.; Kopacz, T.; Heberling, D.: Modulare Testumgebung zur Analyse kooperativer Assistenzsysteme basierend auf V2X-Technologien im kontrollierten Feld. AmE 2015 – Automotive meets Electronics, Dortmund, Deutschland, 2015

[3] Durrant-Whyte, H.; Henderson, T.: Multisensor Data Fusion. In: Siciliano, B.: Springer Handbook of Robotics, Springer Berlin Heidelberg, 2008

[4] Abou-Moustafa, K.; Ferrie, F.: A Note on Metric Properties for Some Divergence Measures: The Gaussian Case. Asian Conference on Machine Learning, Singapur, 2012

[5] Simon, D.: Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity and Nonlinear Approaches. John Wiley & Sons, Inc., 2006

[6] Quack, T.; Heßeler, F.; Abel, D.: Zentrale Sensorfusion für kooperative Fahrerassistenzsysteme in städtischen Kreuzungen. POSNAV 2016 – Konferenz Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation DGON, Berlin, Deutschland, 2016

[7] Michon, J.: A critical view of driver behavior models: What do we know, what should we do? Human behavior and traffic safety, Plenum Press, New York, 1985

[8] Lefèvre, S.; Vasquez, D.; Laugier, C.: A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles. ROBOMECH Journal, Band 1, Ausgabe 1, 2014

[9] Houenou, A.; Bonnifait, P.: Vehicle trajectory prediction based on motion model and maneuver recognition. Intelligent Robots and Systems, Japan, 2013

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Robust Odometry Estimation for Automated Driving and Map Data Collection

M.Sc. **Maximilian Harr**, B.Sc. **Christoph Schäfer**,
Adam Opel GmbH, Rüsselsheim

Abstract

To measure system states and local environment directly with high precision, expensive sensors are required. However, highly accurate system states and local environmental views can also be achieved using data fusion techniques and digital maps. One crucial task of multi-sensor state estimation is to project different sensor measurements into the same temporal, spatial and physical domain, estimate their covariance matrices as well as the exclusion of erroneous measurements.

This paper presents a generic approach for robust odometer estimation. We will shortly present our calibration procedure including the estimation sensor alignments, offset / scaling errors, covariances / correlations and time delays. An improved algorithm for wheel-diameter estimation is presented. Additionally an approach for robust odometry will be shown as odometry estimations are fused under known covariances while outliers are detected using a chi-squared test. Utilizing our robust odometry local environmental views can be associated and fused. Furthermore our robust odometry can be used to detect and exclude erroneous position estimates.

Index Terms - Robust Odometry, Calibration, Covariance Estimation, Localization, Integrity Monitoring, Dead Reckoning, Mapping.

1 Introduction and related work

1.1 Introduction

Precise knowledge of vehicle system states and local environment is an essential task for Intelligent Transportation Systems (ITS) especially for Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). One crucial task of enhanced ADAS systems is the collection of high-precision digital map data. The BMWi-funded project Ko-HAF [1] addresses this challenge towards fully

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

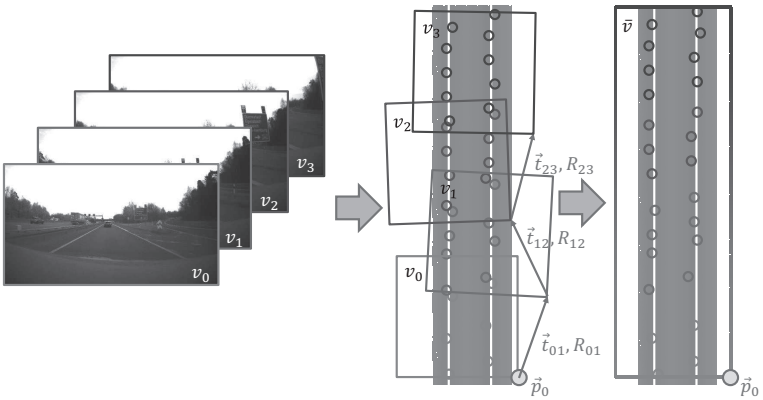


Figure 1: **Local mapping process.** Multiple local environment snapshots need to be fused in a single local view.

autonomous driving vehicles. The goal is to exchange digital map data and dynamic content among a broad range of automotive companies to ensure an enlarged field of view to make driving on highways saver and more efficient. A safety server processes, fuses and filters the environmental perception of all vehicles and provides a collective perception to participating vehicles.

The idea is to locally fuse environmental perception of multiple sensor measurements, such as detected lanes, traffic signs and hazardous obstacles, into one single local view that will be send to the server to decrease data traffic. Fig. 1 shows the local mapping process. A precise spatial transformation consisting of translation $\vec{t}$ and rotation R between each environmental snapshot (commonly referred to as dead reckoning) is thus required. Note that only GNSS position measurements will be used. Landmark-based localization techniques are not used to prevent coupling of erroneous landmarks from digital maps into the newly detected ones. Consequentially high precision requirements follow for transformation with increasing size of local views.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1.2 Related work

Detection, Identification and Adaption-Methods [2], such as Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM), require deep sensor understanding and redundant data. Agogino et al. [3] present squared mahalanobis distance with chi-squared threshold as consistency check known as NIS-Test. An algorithm for combining multiple models is presented in [4]. However, correlations are neglected. Furthermore the Kalman Innovation vector has to be known, hence black-box-solutions can not be checked. An algorithm for switching between models depending on the driving situation is presented in [5]. Chilian et al. [6] present a robust pose estimator using visual odometry, IMU and Leg odometry to estimate the movement and pose of a 6-leg crawler. Erroneous estimates from visual odometry are reweighed using the error state vector. Suenderhauf [7] presents an approach for robust SLAM using pose graphs with switchable variables to exclude outliers during optimization.
Our approach is superior to the ones above as we incorporate and estimate covariance / correlation matrices, reject outliers and fuse odometer estimates without the necessity of positioning sensors or large computational burden. We are furthermore able to cope with limited correlated odometer estimates. Our approach is generic and does not postulate deep sensor understanding or availability of raw sensor data such as RAIM. Additionally we present top-to-bottom calibration of dynamic sensors.

2 Vehicle setup

Our test vehicle is an Opel Insignia displayed in Fig. 2. We use both in-series sensors [steering angle sensor (SAS), wheel speed sensors (WSS), 2D inertial measurement unit (IMU)] provided over CAN as well as additional cameras [Point Grey FL3-GE-28S4M-C on front and back], low-cost GNSS receiver [u-Blox EVK-M8T] and inertial navigation solution (INS) [Genesys ADMA Entry Level]. Latter only as ground truth for validating our algorithms.
Additionally a high-precision digital map has been recorded beforehand. It covers 100km of highway roads around Frankfurt, Germany. Including the roads between Frankfurter, Bad Homburger and Offenbacher Kreuz.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.



Figure 2: **Experimental setup.** 4 Wheel-drive Opel Insignia Sports Tourer MY16 (left). Front camera setup (right).

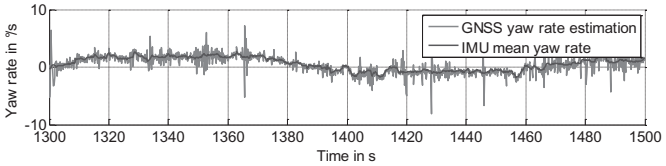


Figure 3: **Derived GNSS orientation**.

3 CALIBRATION

Sensor calibration algorithms include estimation of time delays, sensor alignment (commonly referred to as rigid transformation), offset / scaling and covariances / correlations.

3.1 TIME DELAYS

Significant time delays of sensor measurements typically occur with larger computational burden due to necessary preprocessing. GNSS pseudo- / deltarange calculus or image processing are the most prominent ones. To compute time delays we cross-correlate (time domain) delta orientation of GNSS/visual odometry with integrated IMU yaw rate (see Fig. 3). Peaks in the resulting convolution indicate time delays [8].

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

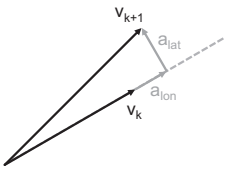


Figure 4: **Derived Velocity**

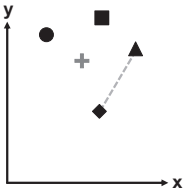


Figure 5: **Odometry**

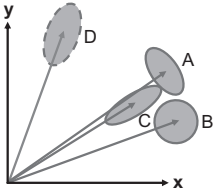


Figure 6: **Error Detection**

3.2 Sensor Alignment

To compute the translation between positioning sensors and acceleration sensors, we derive the position signal two times:

$$v = \frac{d}{dt}(r_0 + r_{rel}) = v_0 + \omega \times r_{rel} + v_{rel} \tag{1}$$

$$a = \frac{d}{dt}v_{rel} = a_0 + \dot{\omega} \times r_{rel} + \omega \times (\omega \times r_{rel}) + 2\omega \times v_{rel} + a_{rel} \tag{2}$$

Where r_0 is the position sensor location, r_{rel} is the relative position of the acceleration sensor in vehicle coordinates and ω is the angular rate. Since v_{rel} and a_{rel} are 0 (rigid transformation) relative and corriolis accelerations cancel out. Relative position r_{rel} of GNSS receiver will be computed by optimizing the difference between differentiated doppler-speed vector and IMU acceleration signals (see Fig. 4). The in-series IMU is assumed to have neglect-able time delay / jitter and is mounted in a well known position. The relative vector can only be observed in dynamic scenarios when high yaw rates yield Euler and centrifugal accelerations. Cameras extrinsic, intrinsic calibration is done via state-of-the-art calibration using enhanced checkerboard-like patterns.

3.3 Offset / Scaling

While Vehicle dynamic sensors (IMU, WSS, SAS) are mounted in well-known positions with negligible time delay, they typically suffer from offset scaling errors. Offset and scaling error can be directly estimated using Recursive Linear Regression. Fig 3 shows GNSS delta orientations and integrated IMU yaw rate between those delta orientations. Steering angle ratio and offset

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

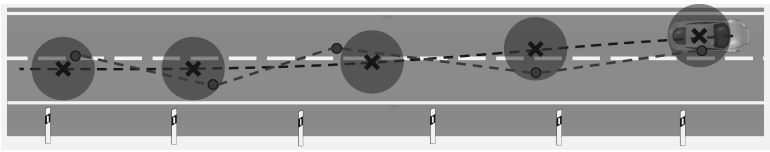


Figure 7: **Absolute path estimation**.
Positions and sensor uncertainty (x) and position estimate (o)

is calibrated using recursive linear regression by comparing kinematic single-track-model [9] with small angle approximation θ and calibrated yaw rate.

$$\dot{\psi} = \frac{1}{l_f + l_r} v\delta \qquad l_f/l_r\text{: distance between COG and front / rear axis}$$

Each wheel of our test vehicle is equipped with a cyclic counter measuring the amount of rotations. A total amount of 48 ticks is equivalent to a full rotation. However, to compute velocity or traveled distance the wheel diameter has to be estimated precisely. Wheel diameters are usually estimated using positioning sensors like GNSS. Though the estimated traveled path between position measurements is larger than the true traveled path as position uncertainty increases (see fig 7). One way to account for this error is to numerically integrate eq. (3) as the gaussian integral has no indefinite integral. Without loss of generality we define x to be the direction between of the movement.

$$\iiint_{p_i} \iiint_{p_j} f(p_i) f(p_j) ||p_i - p_j|| dp_i dp_j \tag{3}$$

Alternatively, the following assumptions simplify the posed problem:

1. The positioning systems probability density function(PDF) is a 3D multivariate normal distribution with zero mean and diagonal covariance matrix Σ
2. The diagonal elements of Σ are equal ($\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$)

These are strong assumptions, that will be investigated when violated. We derive the formula for the distance between two spheres using spherical coordinates:

$$d_{ss}(d, R_1, R_2) = d + \frac{R_1^2 + R_2^2}{3d} \qquad \forall d > R_1 + R_2$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Where d is the distance between the spheres and R_1 and R_2 are the sphere radii. Using the Maxwell Boltzmann distribution:

$$P_R(r) = \iint_D f(p_i)dxdydz = .. = \frac{2}{\sqrt{2\pi\sigma^3}} r^2 \exp(-\frac{1}{2\sigma^2} r^2)$$

the sphere distance formula and the definite integral of the Gaussian function, we can algebraically solve:

$$\begin{aligned} d_{err} &= \int_{r_1=0}^{\infty} \int_{r_2=0}^{\infty} P_R(r_1) P_R(r_2) d_{ss}(d, r_1, r_2) \\ &= \int_{r_1=0}^{\infty} \int_{r_2=0}^{\infty} [3d^2 r_1^2 r_2^2 + r_1^4 r_2^2 + r_1^2 r_2^4] \exp(-\frac{r_1^2}{2\sigma_1^2}) \exp(-\frac{r_2^2}{2\sigma_2^2}) = d + \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{d} \end{aligned}$$

Which can be solved for d. The first assumption is usually valid as covariance matrices are similarly aligned between two measurements. The second assumption may usually be violated. For example GNSS measurements tend to have higher uncertainties in altitude estimation than in horizontal estimation. To account for this we compute a mean covariance from perpendicular covariance σ_{yy} and σ_{zz}:

$$\sigma_{est}^2 = \frac{\sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2}{2} \tag{4}$$

3.4 Covariance / Correlation Estimation

Covariance Matrices between two samples X_1 and X_1 can be computed using the following formula:

$$\Sigma_{1,2} = E[(X_1 - \mu_1)(X_2 - \mu_2)^T]$$

Figure 5 shows odometry estimates (black) around the true, unknown odometry μ_{true} (gray). We assume that our odometers have multivariate normal distribution with mean μ_{true}. To compute the covariance of and correlation between odometry estimates (like visual odometry, single-track model, WSS+IMU, ..) the mean μ_{true} needs to be known, but can not be estimated using the sample mean as it is different for each measurement. The idea is to subtract odometry estimates (Fig. 5, gray line). Which results in:

$$X_1 \sim \mathcal{N}(\mu_1, \Sigma_1) \qquad\qquad X_{12} = X_1 - X_2$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$X_2 \sim \mathcal{N}(\mu_2, \Sigma_2) \qquad X_{12} \sim \mathcal{N}(0, \Sigma_1 + \Sigma_2) \qquad X_1, X_2 \quad uncorrelated$$
$$\mu_2 = \mu_2 \qquad X_{12} \sim \mathcal{N}(0, \Sigma_2 - 2\Sigma_{12} + \Sigma_1) \qquad X_1, X_2 \quad correlated$$

For k uncorrelated odometers there are $k \cdot (k-1)/2$ possible combinations. Eq. 6 shows the k=3 and general case if all odometry estimates are uncorrelated.

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Sigma}_{1-2} \\ \tilde{\Sigma}_{1-3} \\ \tilde{\Sigma}_{2-3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_j & I_j & 0 \\ I_j & 0 & I_j \\ 0 & I_j & I_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\Sigma}_1 \\ \tilde{\Sigma}_2 \\ \tilde{\Sigma}_3 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \tilde{\Sigma}_{1-2} \\ \vdots \\ \tilde{\Sigma}_{1-k} \\ \tilde{\Sigma}_{2-3} \\ \vdots \\ \tilde{\Sigma}_{(k-1)-k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_j & I_j & 0 & 0 & \cdots \\ I_j & 0 & I_j & 0 & \cdots \\ I_j & 0 & 0 & I_j & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & I_j & I_j & 0 & \cdots \\ 0 & I_j & 0 & I_j & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\Sigma}_1 \\ \vdots \\ \tilde{\Sigma}_k \end{bmatrix} \tag{5}$$

$\tilde{\Sigma}$ is the column vector of upper triangular matrix of $\Sigma \in \mathbb{R}^{n \times n}$ with size $j = (n \cdot (n-1)/2)$. The matrices can then be computed solving the least squares problem:

$$b = Ax \qquad\qquad x = (A^T A)^{-1} A^T b$$

If samples are correlated the number of unknowns increases by k_{corr}. For each correlated sample-set xy we strike out the respective row in eq. 5 and solve for the correlation matrix later:

$$\Sigma_{xy} = \frac{1}{2}(\Sigma_x + \Sigma_y - \Sigma_{x-y}) \tag{6}$$

Note that if too many samples are correlated the problem can not be solved. The whole calibration process is depicted in Figure 8.

4 Fusion and Outlier Rejection

With the calibrated sensor setup and known covariances/correlations we detect erroneous odometry outliers using state-of-the-art NIS-Test. If a sensor has larger Mahalanobis Distance than expected (using χ^2-table) then the estimate is rejected. Fig. 6 shows the exclusion of transformation D from a subset of four transformations A-D. If less than three transformation

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

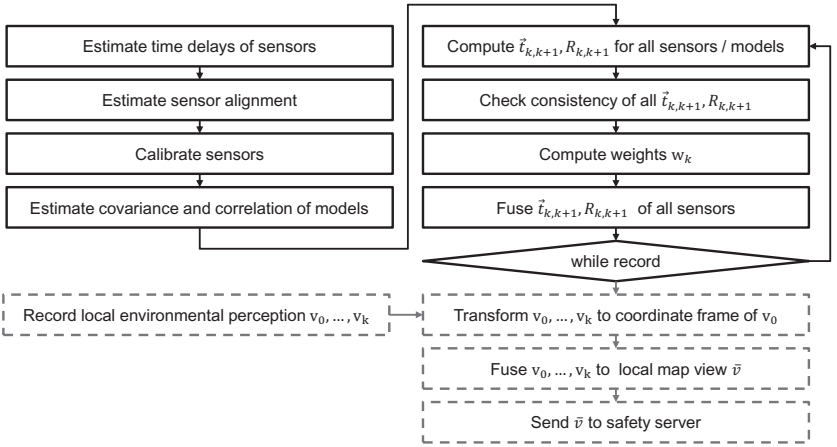


Figure 8: **Flow chart.** Calibration, covariance estimation, outlier rejection and fusion.

are available, past transformations can be used for consistency check after they have been updated. The latter requires an accurate propagation algorithm for transformations. Which we implemented using our calibrated IMU:

$$dx_{k+1} = dx_k + n \cdot a_{lon} + n_\perp \cdot a_{lat} \tag{7}$$

Where n is the direction of dx_k The resulting transformation between environmental perceptions will then be computed by combining all valid transformations iteratively (using eq 8). Note that correlated estimates are fused using their uncorrelated covariance matrices and adding their cross-correlation matrix to the uncertainty of the resulting estimate.

$$K_k = P_{aa}H^T(HP_{aa}H^T + P_{bb})^{-1} \qquad c = a + K_k(b - Ha) \qquad P_{cc} = P_{aa} - K_kHP_{aa} \tag{8}$$

5 Experimental results

To show the performance of our improved path estimation algorithm, for wheel diameter estimation, we generated 2000 samples along the x-axis with distance d to simulate a straight movement. Each sample additionally has random 3D normal distribution noise to simulate sen-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

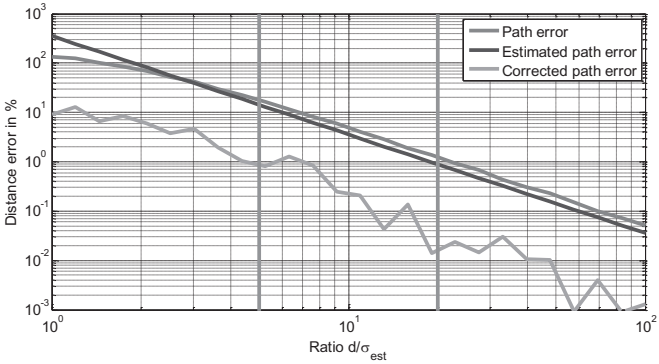


Figure 9: **Wheel diameter calibration**. $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 0.5\sigma_{zz} = 1$. 2000 3D normally distributed samples per data point with increasing distance d along x-axis.

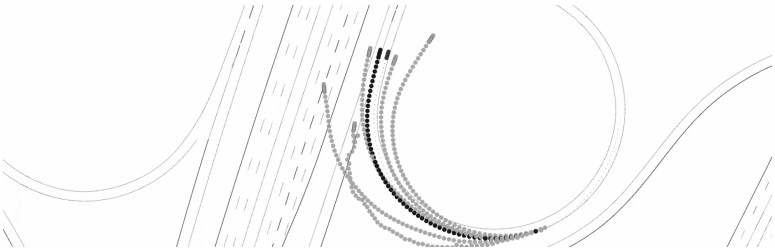


Figure 10: **Robust odometry**. Gray lines show odometer estimates. Black dot is the last vehicle position. Black line is the robust odometer estimation

sor uncertainty. Figure 9 shows the path error if sensor noise is neglected compared to the true traveled path and our corrected estimate (light gray). As the ratio of d and $\sigma_{est} = (\sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2)/2$ increases the error decreases exponentially. Figure 10 shows our robust odometry (black) among other odometer estimates. Thin lines show the digital map data of the Offenbacher Kreuz. Figure 11 shows the detected lanes from multiple camera images. Translation and rotation between images has been computed using our robust odometry. The lanes can now be assigned and fused.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

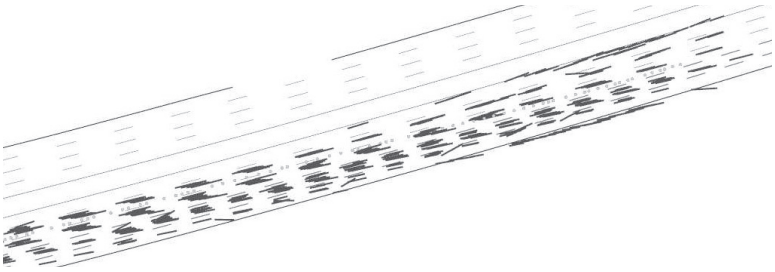


Figure 11: **Map data with robust odometry**. Thick lines represent detected lane marks.

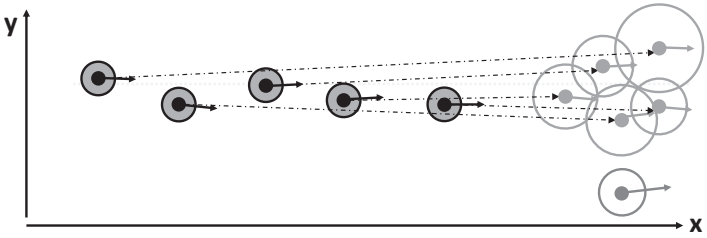


Figure 12: **Outlier rejection of position estimates using robust odometry**.

6 Conclusions and Future Work

In this paper we presented a top-to-bottom calibration cycle with covariance / correlation matrix estimation. A new approach to estimate wheel diameters has been shown. We use state-of-the-art NIS-test to check odometers for consistency and exclude erroneous measurements. Our approach for robust odometry can be used to check consistency of positioning signals (see Fig 12). Prior position estimates (black) can be used to check new positioning signal (gray) at time t_k. The robust odometer can be used to project prior estimates (light gray) to time t_k.

7 Acknowledgments

We thank the Opel Concept & Teardown Workshop for their indispensable support and help with the Opel Insignia, including but not limited to Michael Dahlke and Roman Rudek. We

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

furthermore thank the Adam Opel GmbH for their support. Last but not least we would like to thank the Ko-HAF team for all the enrichments and thoroughly good discussions.

REFERENCES

[1] Bundesministerium fuer Wirtschaft und Energie. Kooperatives hochautomatisiertes fahren. http://ko-haf.de.

[2] Heidi Kuusniemi, Andreas Wieser, Gerard Lachapelle, and Jarmo Takala. User-level reliability monitoring in urban personal satellite-navigation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 43(4):1305–1318, 2007.

[3] Alice Agogino, Susan Chao, Kai Goebel, Satnam Alag, Bradly Cammon, and Jiangxin Wang. Intelligent diagnosis based on validated and fused data for relilability and safety enhancement of automated vehicles in an ivhs. *California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)*, 1998.

[4] Tariq S Abuhashim, Mamoun F Abdel-Hafez, and Mohammad Ameen Al-Jarrah. Building a robust integrity monitoring algorithm for a low cost gps-aided-ins system. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 8(5):1108–1122, 2010.

[5] Rafael Toledo-Moreo, Miguel Zamora-Izquierdo, Benito Úbeda-Miñarro, Antonio F Gómez-Skarmeta, et al. High-integrity imm-ekf-based road vehicle navigation with low-cost gps/sbas/ins. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 8(3):491–511, 2007.

[6] Annett Chilian, Heiko Hirschmüller, and Martin Görner. Multisensor data fusion for robust pose estimation of a six-legged walking robot. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2497–2504. IEEE, 2011.

[7] Niko Sünderhauf. Robust optimization for simultaneous localization and mapping. 2012.

[8] G Carter and C Knapp. Time delay estimation. In *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'76.*, volume 1, pages 357–360. IEEE, 1976.

[9] Rajesh Rajamani. *Vehicle dynamics and control*. Springer Science & Business Media, 2011.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Potenzialanalyse prädiktiver Streckendaten zur Komfortsteigerung von Fahrzeugen mit geregelten Vertikaldynamiksystemen

M.Sc. **Andreas Noll**, I/EF-82, Audi AG, Ingolstadt;
Prof. Dr.-Ing. habil. **Christoph Ament**, Lehrstuhl für Regelungstechnik in der Ingenieurinformatik, Universität Augsburg, Augsburg

Kurzfassung

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht eine simulative Untersuchung auf dem Gebiet der „präadaptiven Fahrwerkregelung“ im Automobilbereich mit dem Schwerpunkt der Schwarmdatenverarbeitung von prädiktiven Streckendaten. Hierzu wird eine Potenzialanalyse durchgeführt, welche die vorgestellten adaptiven und semi-aktiven Fahrwerkregelsysteme mit den generierten Streckendaten kombiniert. Ziel ist es, den Einfluss von Fahrbahnunebenheiten auf die Vertikaldynamiksysteme zu analysieren und die signifikanten Fahrbahnparameter, welche einen essentiellen Beitrag zum Fahrzeugschwingverhalten leisten, zu identifizieren. Die gewonnen Informationen können zukünftig durch ein globales Serversystem (Car-2-X) den Fahrzeugen zur Verfügung gestellt werden, sodass diese im Vorfeld von Ereignissen und Fahrbahnzuständen verschiedene Maßnahmen einleiten können. Auf Basis der gewonnen Simulationsergebnisse werden hierfür entsprechende präadaptive vertikale Regelstrategien bzw. Fahrstrategien hergeleitet.

1. Einleitung

In heutigen Fahrzeugen kommen bereits viele unterschiedliche geregelte Vertikaldynamiksysteme zum Einsatz [1], die das Fahrverhalten hinsichtlich Fahrkomfort gegenüber passiven Fahrzeugen verbessern. Hierzu gehören Komponenten wie Verstelldämpfer, Luftfederung und eine aktive Wankstabilisierung. Aktuelle Ansätze verwenden darüber hinaus eine Kopplung von bestehenden aktiven Vertikal- und Preview-Systeme (vorausschauende Systeme), welche auf Grundlage von kamera- und laserbasierten Daten prädiktive Streckeninformationen generieren. Alle diese Regelsysteme
verfolgen i.d.R. das Ziel der situationsabhängigen Komfort bzw. Fahrdynamikoptimierung und beschränken sich dabei auf das durch Sensoren erfassbare Fahrzeugumfeld.
In naher Zukunft werden jedoch die nicht prädiktiven aktiven und semi-aktiven vertikalen Regeleinheiten in ihren Eigenschaften ausgereift sein. D.h. die Komforteigenschaften können

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

mit den aktuellen Systemkomponenten nicht mehr entscheidend verbessert werden, da diese bzgl. der Dynamik der Aktoren und der vorhandenen Fahrzeugsensorik ausgereizt sind. Auch die zurzeit verwendeten Preview-Systeme sind in ihrer Funktionalität eingeschränkt. Aufgrund von wechselnden Umgebungsbedingungen und begrenztem Erfassungsbereich von Sensoren wie Kamera, Laser usw. neigen diese zu Fehlentscheidungen, da sie in ihrer prädiktiven Sichtweise eingeschränkt sind.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Potential von prädiktiven Straßenzustandsinformationen für adaptive und semi-aktive vertikale Regelsysteme aufgezeigt. Wie bereits die vorangegangenen Untersuchungen [2], [3] zeigten, lassen sich die hierfür notwendigen Straßeninformationen mit Hilfe eines modellbasierten Straßenbeobachters generieren. Das Fahrzeug wird dabei als eine Art Straßenbeobachter betrachtet, mit dessen Hilfe sich das vertikale Straßenhöhenprofil kontinuierlich über den vier Radaufstandspunkten rekonstruieren lässt. Der betrachtete Frequenzbereich der geschätzten Höhensignale beträgt dabei ca. 0.5 bis 15 Hz, was ebenso Einzelhindernisse wie bspw. Temposchwellen und Schlaglöcher mit einschließt, siehe [2]. Dieser Ansatz wurde anschließend für die Konzeptentwicklung von präadaptiven Regelstrategien in [3] aufgegriffen und entsprechend für eine Straßenklassifizierung u.a. nach ISO8608:1995(E) [4] und einer Einzelhindernisdetektion im Fahrzeug erweitert. Mit Hilfe des Straßenbeobachters erfolgt die Bewertung der gesamten Straße in zwei Phasen. Zum einen wird der Straßenzustand auf Basis der Betrachtung des Frequenzbereichs ermittelt und zum anderen erfolgt die Detektion von Einzelhindernissen durch Auswertung des Zeitbereichs. Die gesammelten Straßeninformationen von den Fahrzeugen werden anschließend im Backend ausgewertet, indem die Schwarmdaten durch *Map Matching* und *Clustering* verknüpft und aggregiert werden. Am Ende werden die generierten Daten dem nachfolgenden Verkehr wieder zur Verfügung gestellt [3], sodass auf diese Weise die notwendigen vorausschauenden Straßeninformationen für diesen Beitrag vorliegen und das Potential prädiktiver Streckendaten zur Komfortsteigerung von Fahrzeugen mit geregelten Vertikaldynamiksystemen analysiert werden kann.

2. Eigenschaften von Fahrbahnunebenheiten

Einzelhindernisse stellen eine erste Form der Fahrbahnunebenheit dar, siehe Bild 1. Diese treten beim Überfahren einer Straße in unregelmäßigen Abständen auf und können als kurzzeitige transiente Änderung des Fahrbahnverlaufs aufgefasst werden, welche zu einer impuls- oder sprungförmigen Fahrzeuganregung führen. Dabei besitzt die Form des Hindernisses einen maßgeblichen Einfluss auf das Fahrzeugschwingverhalten und die Auswirkungen auf die Fahrzeuginsassen. Je nach Anstieg der steigenden und fallenden Flanke sowie der

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Hindernislänge und -höhe können sowohl der Fahrzeugaufbau (komfortrelevant) als auch die Räder (sicherheitsrelevant) zum Schwingen angeregt werden.

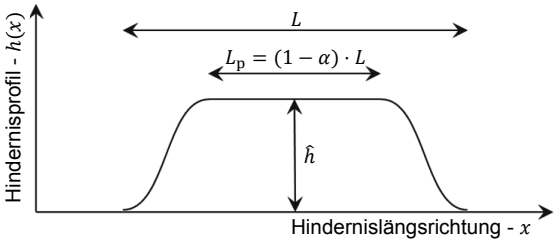


Bild 1: Darstellung positives Einzelhindernis mit Hindernislänge L, Plateaulänge L_p und maximaler Hindernishöhe $\hat{h}$

Aus mathematischer Sicht gibt es dabei verschiedene Möglichkeiten ein Einzelhindernis zu definieren. Wie bereits [5], [7], [8] gezeigt haben, lassen sich Einzelhindernisse vereinfacht durch eine abschnittsweise definierte $(1-\cos)$-Funktion bzw. Cosinus-Schwelle und Kanten durch eine $1/4\,\sin$-Funktion darstellen. Diese Ansätze lassen sich jedoch zusammenführen und erweitern. Ausgehend von der aus der Fourier-Analyse bekannten Tukey-Fensterfunktion [6], lässt sich für die Darstellung einer positiven bzw. negativen Schwelle folgende Erweiterung um den Parameter α treffen:

$$h(x) = \begin{cases} \frac{\hat{h}}{2}\cdot\left(1+\cos\left(\frac{2\pi}{\alpha}\cdot\left(\frac{x}{L}-\frac{\alpha}{2}\right)\right)\right) & ,\ 0 \le \frac{x}{L} < \frac{\alpha}{2} \\ \hat{h} & ,\ \frac{\alpha}{2} \le \frac{x}{L} < 1-\frac{\alpha}{2} \\ \frac{\hat{h}}{2}\cdot\left(1+\cos\left(\frac{2\pi}{\alpha}\cdot\left(\frac{x}{L}-1+\frac{\alpha}{2}\right)\right)\right) & ,\ 1-\frac{\alpha}{2} \le \frac{x}{L} \le 1 \\ 0 & ,\ ansonsten \end{cases} \tag{1}$$

$$0 \le \alpha \le 1\ ,\ \mathrm{L} > 0$$

wobei $\hat{h}$ die maximale Hindernishöhe und L die Hindernislänge repräsentieren, siehe Bild 1. Der Formfaktor α beschreibt das Verhältnis zwischen Anstiegsphase bzw. Kantenlänge und Gesamthindernislänge L. Somit ist die Möglichkeit gegeben, neben dem Sonderfall $\alpha = 1$: $(1-\cos)$-Funktion bzw. Cosinus-Schwelle, eine Plateaulänge $L_\mathrm{p} = (1-\alpha)\cdot L$ festzulegen.

In der Regel weist das restliche reale Fahrbahnoberflächenprofil keine periodischen Unebenheiten auf, sodass regellose bzw. stochastische Fahrbahnunebenheiten den größten Anteil im weiteren Straßenverlauf einnehmen. Für die Beschreibung einer solchen stochastischen Fahrbahnanregung wird in der Literatur häufig die spektrale Unebenheitsdichte $\Phi(\Omega)$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

verwendet. Diese beschreibt in Analogie zur spektralen Leistungsdichte eines Signals den Erwartungswert für die quadrierte Amplitude je zugehöriger Frequenz im Spektrum, siehe [7] - [10].

Die spektrale Unebenheitsdichte lässt sich aufgrund von verschiedenen realen Fahrbahnvermessungen [9], [10] und den kaum vorhandenen periodischen Anteil im Straßenhöhenprofil standardisiert durch das Potenzgesetz nach (2) und den Begriffen der Welligkeit w der Straße und des Unebenheitsmaßes Φ_0 zur Bezugswegkreisfrequenz Ω_0 approximieren, siehe [7] - [10]:

$$\Phi(\Omega) = \Phi_0(\Omega_0) \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-\mathrm{w}}, \qquad \Omega > 0 \tag{2}$$

Der Zusammenhang zwischen der zeit- und wegabhängigen spektralen Unebenheitsdichte der Fahrbahn ergibt sich für konstante Fahrzeuggeschwindigkeiten v wie folgt:

$$\Phi(\omega) = v^{-1}\Phi(\Omega) = v^{\mathrm{w}-1} \cdot \Omega_0^{\mathrm{w}} \cdot \Phi_0(\Omega_0) \cdot \omega^{-\mathrm{w}} = P \cdot \omega^{-\mathrm{w}} \tag{3}$$

mit

$$\Omega = \frac{\omega}{v} \tag{4}$$

wobei P das geschwindigkeitsabhängige Unebenheitsmaß repräsentiert. Auf diese Art und Weise lässt sich die Straßenklassifizierung ebenfalls auf die Bezugsgrößen: Welligkeit w und Unebenheitsmaß Φ_0 reduzieren, siehe [3], [4].

2. Modellbildung

Das dynamische Verhalten eines Kraftfahrzeugs durch vertikale Straßenanregung lässt sich je nach Komplexität anhand verschiedener Modelle beschreiben. Der wohl einfachste Ansatz ist das sogenannte Viertelfahrzeugmodell, welches u.a. in [5], [7], [8], [11], [12] ausführlich beschrieben wird und für die verschiedenen Untersuchungen als Basis dient. Bei Vernachlässigung von Nick- und Wankbewegungen und unter der Annahme eines symmetrischen Fahrzeugaufbaus entlang der Quer- und Längsachse, lässt sich ein Kraftfahrzeug auf einen linearen, minimalphasigen Zwei-Massen-Schwinger mit Relativgrad r und einer Aktorkraft $u(t)$ als Eingangsgröße reduzieren, siehe Bild 2a.

Die Fahrzeugmasse m_{A} ergibt sich dabei aus dem Viertel der Gesamtmasse des Aufbaus, welche über ein Feder-Dämpfer-Aktor-System mit der Radmasse m_{R} verbunden ist. Die Feder- und Dämpferelemente werden durch eine linearisierte Federsteifikgeit c_{A} und Dampferkonstante k_{A} modelliert. Der Kontakt mit der Straße wird anhand eines Reifenmodells abgebildet. Dabei lässt sich, mit einer hier hinreichenden Näherung, eine lineare Ersatzfeder mit der Federkonstante c_{R} verwenden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

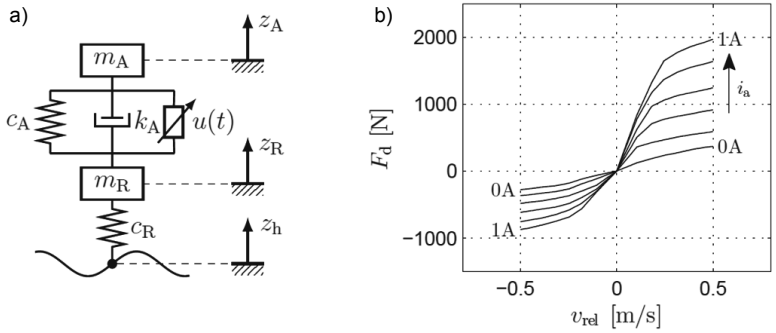


Bild 2: Lineares Viertelfahrzeugmodell (links) und reales Dämpferkennfeld (rechts) eines semi-aktiven Verstelldämpfers in Abhängigkeit des Dämpferstroms i_a

3. Reglungskonzepte

Die einfachste Form der Fahrwerksreglung/-steuerung ist die Vorgabe eines definierten Sollverhaltens bzw. Sollcharakteristik. Am Beispiel eines linearen Viertelfahrzeugmodells mit einem semi-aktiven Verstelldämpfer bedeutet dies, die Vorsteuerung eines Sollstroms i_a zur Beeinflussung des Dämpfungsverhaltens analog Bild 2b.

Es empfiehlt sich, zur einfacheren Modellierung des Viertelfahrzeugs den Dämpfungseinfluss k_A zu entkoppeln und die Dämpferkräfte als Eingangsgröße zu implementieren. Auf diese Weise kann neben einer linearisierten Dämpferkonstante k_A auch ein nichtlineares Dämpferkennfeld analog Bild 2b betrachtet werden. Unter der Annahme des Zustandsvektors $\underline{x} = (z_{rel} = z_A - z_R, \dot{z}_A, z_R, \dot{z}_R)^T$, der Störgröße $w = z_h$ und der Stellgröße $u(t) = i_a(t)$ lässt sich die Zustandsgleichung für das Viertelfahrzeugmodell mit Zustandsrückführung nach Bild 2a folgendermaßen herleiten

$$\dot{\underline{x}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{c_A}{m_A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_A}{m_R} & 0 & -\frac{c_R}{m_R} & 0 \end{pmatrix}}_{=: \mathbf{A}} \underline{x} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m_A} \\ 0 \\ \frac{1}{m_R} \end{pmatrix}}_{=: \underline{b}_u} f_{k_A}(v_{rel}, i_a) + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{c_R}{m_R} \end{pmatrix}}_{=: \underline{b}_w} w \tag{4}$$

wobei $\mathbf{A}$ die Systemmatrix ohne Dämpfungskonstante k_A, $\underline{b}_u$ den Eingangsvektor für die Dämpferkraft $f_{k_A}(v_{rel}, i_a)$ und $\underline{b}_w$ den Eingangsstörvektor repräsentieren.

Parallel zur Sollstromvorgabe wird in diesem Beitrag die wohl mit am weitesten verbreitete Fahrwerksreglung betrachtet, welche nach dem sogenannten *Skyhook-Prinzip* und *Ground-*

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

hook-Prinzip agiert, siehe Bild 3. Dabei werden Aufbau und Rad über einen virtuellen Dämpfer mit einem inertialen Referenzsystem bzw. mit der Fahrbahn verbunden, umso die Aufbau- und Radbewegung optimal zu dämpfen. Die notwendigen Kräfte, die sich durch die virtuellen Dämpfer ergeben, werden dabei durch den realen Aktor bzw. semi-aktiven Dämpfer zwischen Aufbau und Rad generiert.

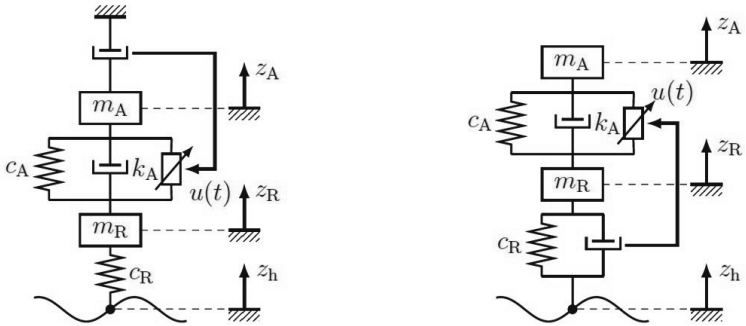


Bild 3: Skyhook-Prinzip (links) und Groundhook-Prinzip (rechts) am Viertelfahrzeugmodell

Für einen idealen Hybrid-Regler aus Skyhook- und Groundhook-Prinzip ergibt sich auf diese Weise das folgende Regelgesetz

$$u = \left(0, k_{\mathrm{sky}}, 0, -k_{\mathrm{gro}}\right)^{\mathrm{T}} \underline{\mathrm{x}} \tag{5}$$

mit dem Skyhook-Faktor k_{sky} und Groundhook-Faktor k_{gro}. Da ein semi-aktiver Verstelldämpfer nicht in allen vier Quadraten Kräfte aufbringen kann, siehe Bild 2b, resultiert für die Zustandsgleichung des Viertelfahrzeugmodells mit Hybrid-Regler

$$\dot{\underline{\mathrm{x}}} = \mathbf{A}\underline{\mathrm{x}} + \underline{b}_{\mathrm{u}} u_{\mathrm{k_A}} + \underline{b}_{\mathrm{w}} w \tag{6}$$

und inkl. der Aktorbegrenzung für den semi-aktiven Verstelldämpfer:

$$u_{\mathrm{k_A}} = \begin{cases} f_{\mathrm{k_A}}(v_{rel}, \min(i_a)), & u < f_{\mathrm{k_A}}(v_{rel}, \min(i_a)) \\ f_{\mathrm{k_A}}(v_{rel}, \max(i_a)), & u > f_{\mathrm{k_A}}(v_{rel}, \max(i_a)) \\ u \quad , & \text{ansonsten} \end{cases} \tag{7}$$

4. Bewertungsmaße für Fahrkomfort und Fahrsicherheit

Bei der Überfahrt einer stochastischen Fahrbahn wird das Fahrzeugschwingverhalten maßgeblich von dem vertikalen Straßenhöhenprofil angeregt und weniger durch Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Lenkvorgängen beeinflusst. Dabei können allgemeine Aussagen zu Fahrkomfort und Fahrsicherheit bereits an einfachen Bewertungsgrößen wie die Stan-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

dardabweichung der Radlast bezogen auf die statische Radlast $\sigma_{\mathrm{R}}/F_{\mathrm{R,stat}}$, das Verhältnis der Standardabweichung der Aufbaubeschleunigung zur Erdbeschleunigung $\sigma_{\mathrm{a}}/\mathrm{g}$ sowie die Radeinfederung bezogen auf die halbe maximal zulässige Radeinfederung $\sigma_{z_{\mathrm{rel}}}/(0.5 \cdot z_{\mathrm{rel,max}})$ beurteilt werden. Um das Fahrzeugschwingverhalten zu beurteilen, können die definierten Bewertungskriterien in einer allgemeinen Kostenfunktion wie folgt zusammengefasst werden

$$J = \lim_{T\to\infty} E\left\{\rho_{\mathrm{F_R}} \frac{\sigma_{\mathrm{R}}}{F_{\mathrm{R,stat}}} + \rho_{\mathrm{F_R}} \frac{\sigma_{\mathrm{a}}}{\mathrm{g}} + \rho_{\mathrm{a}} \frac{2\sigma_{z_{\mathrm{rel}}}}{z_{\mathrm{rel,max}}}\right\} \tag{8}$$

wobei jedes Bewertungsmaß q_{eff} mit einer Wichtungsfunktion ρ_q nach Bild 4 versehen ist.

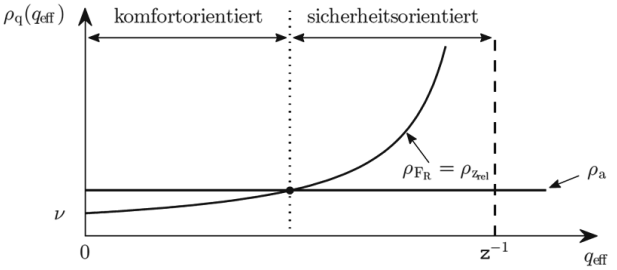


Bild 4: Darstellung der Wichtungsfunktionen für die Kostenfunktion nach (8)

Es ist zu erkennen, dass die Wichtungsfunktion $\rho_{\mathrm{F_R}}$ und $\rho_{z_{\mathrm{rel}}}$ einen hyperbolischen Verlauf mit einer Polstelle beim zulässigen inversen z-Wert (Konfidenzintervall) z^{-1} aufweist und somit nur endliche Funktionswerte für $q_{eff} < z^{-1}$ zulässt. Demgegenüber weist ρ_{a} eine höhere Wichtung unterhalb von $z^{-1}/2$ auf. Dies führt bei niedrigen Bewertungskriterien zu einer komfortorientierten Auslegung ($\rho_{\mathrm{a}} > \rho_{\mathrm{F_R}}, \rho_{z_{\mathrm{rel}}}$) wohingegen bei höheren Werten eine sicherheitsrelevante Auslegung dominiert ($\rho_{\mathrm{a}} < \rho_{\mathrm{F_R}}, \rho_{z_{\mathrm{rel}}}$).

5. Analyse adaptiver Fahrwerksysteme

Um den Einfluss der Fahrbahnunebenheiten auf ein Fahrzeug zu verdeutlichen, wird im Nachfolgenden ein Viertelfahrzeugmodell (siehe Bild 2a) mit verschiedenen Fahrbahnanregungen nach (1) und (3) beaufschlagt und die Kostenfunktion nach (8) analysiert. Durch ein entsprechendes Optimierungsverfahren, bspw. einen *Genetischen Algorithmus* [13], wird anschließend der Dämpferstrom i_{a} nach Bild 2b optimiert, sodass die Kostenfunktion nach (8) minimal ist. Auf diese Weise wird aufgezeigt, welche Dämpferapplikation für die entsprechende Fahrbahngegebenheit optimal ist, siehe Bild 5.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

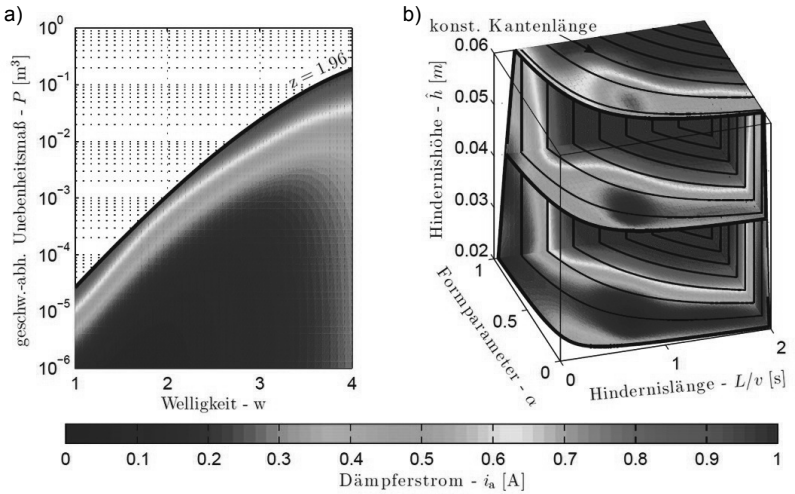


Bild 5: Optimierung des Dämpferstroms i_a eines Viertelfahrzeugmodells mit realem Dämpferkennfeld nach Bild 2 bei der Fahrbahnanregung nach (3) (links) und Einzelhindernisanregung nach (1) (rechts)

Anhand von Bild 5 ist zu erkennen, dass kein „idealer“ konstanter Dämpferstrom i_a für jede Fahrsituation existiert. Je nach Fahrbahn- und Einzelhindernisanregung wandert der Wert zwischen den Grenzwerten, sodass die Kenntnis über die Fahrbahnunebenheit in Form von prädiktiven Streckendaten zur Komfortsteigerung von Fahrzeugen mit bereits variabler Dämpfercharakteristik beiträgt. Im Vergleich zum gewählten Referenzfahrzeug ($i_\mathrm{a} = 0.3\mathrm{A}$) resultiert eine durchschnittliche Verbesserung der Kostenfunktion nach (8) um 28% in 10% und um 50% in 3.6% der Kennfelder. Bei genauerer Betrachtung der stochastischen Fahrbahnunebenheitsanregung ist ersichtlich, dass der Dämpferstrom i_a mit steigendem Unebenheitsmaß P und Annäherung an den Grenzbereich ansteigt. Die Ursache liegt an dem wachsenden Sicherheitsaspekt, welcher mit einer höheren Raddämpfung einhergeht, um so den Kontakt zur Straße sicherzustellen bzw. den zur Verfügung stehenden Federweg nicht zu verletzten. Demgegenüber erfolgt im unteren Bereich des Kennfeldes eine Optimierung des Fahrkomforts durch Entkopplung des Aufbaus zum Rad mit einem niedrigen Dämpferstrom i_a bei niedrigen Welligkeit w (hochfrequente Anregung) und eine stärkere Anbindung des Fahrzeugaufbaus zur Fahrbahn bei hoher Welligkeit w (niederfrequente Anregung). Ein ähnliches Bild resultiert bei der Befahrung von Einzelhindernissen, siehe Bild 5b. Auch hier

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

ist ersichtlich, dass mit steigender Hindernishöhe das Kennfeld grundsätzlich zu einem höheren Dämpferstrom i_{a} tendiert. Der Grund liegt erneut an dem wachsenden Sicherheitsaspekt. Jedoch lassen sich auch hier prinzipielle Aussagen für den optimalen Dämpferstrom i_{a} treffen, welche in Verbindung mit der Fahrbahnbeschaffenheit zu folgender Herleitung präadaptiver Regelstrategien für adaptive Fahrwerksysteme führt:

(1) Erhöhung des Dämpferstroms infolge (a) der Gefährdung der Fahrsicherheit, welche anhand des geschw.-abh. Unebenheitsmaßes respektive Hindernishöhe identifiziert werden kann, und (b) niederfrequenter Fahrbahnanregung, zu erkennen an einer hohen Fahrbahnwelligkeit bzw. großen Hindernislänge und Kantenlänge.

(2) Herabsetzung des Dämpferstrom infolge (a) nicht kritischer Fahrsituationen, und (b) hochfrequenter Fahrbahnanregung bei niedrigen Fahrbahnwelligkeiten bzw. kurzen Hindernislängen und Kantenlängen.

6. Analyse semi-aktiver Fahrwerksysteme

Die Aufgabe eines semi-aktiven Verstelldämpfers ist, ähnlich die eines vorausschauenden präadaptiven Fahrwerksystems nach Abschnitt 5, die Aufbau- und Radbewegung durch Anpassung des Dämpferstroms i_{a} zu dämpfen bzw. zu reduzieren. Die Herausforderung liegt dabei in der Reglerapplikation, da im ungünstigsten Fall nur eine Bewegung durch den semi-aktiven Verstelldämpfer gedämpft werden kann. Um den Einfluss der Fahrbahnunebenheiten auf die Reglervariante zu verdeutlichen, wird im Nachfolgenden ein geregeltes Viertelfahrzeugmodell (siehe Bild 3) mit verschiedenen Fahrbahnanregungen nach (1) und (3) beaufschlagt und die Kostenfunktion nach (8) analysiert. Ziel ist es, durch ein Optimierungsverfahren aufzuzeigen, welche Parametrierung des Regelgesetzes eines Hybrid-Reglers nach (5) für die entsprechende Fahrbahngegebenheit optimal ist, siehe Bild 6.

Es ist ersichtlich, dass analog zu Bild 5 keine „ideale“ konstante Reglerapplikation für den Skyhook-Faktor k_{sky} und Groundhook-Faktor k_{gro} existiert. Je nach Fahrbahn- und Einzelhindernisanregung ändern sich die Faktoren, sodass die Kenntnis über die Fahrbahnunebenheit in Form von prädiktiven Streckendaten ebenfalls zur Komfortsteigerung von Fahrzeugen mit geregelten Fahrwerkssystemen genutzt werden kann. Im Vergleich zum gewählten Referenzfahrzeug ($D_{\mathrm{sky}} = 0.3;\ D_{\mathrm{gro}} = 0.3$) resultiert eine durchschnittliche Verbesserung der Kostenfunktion nach (8) um 10% in 90% und um 50% in 10% der Kennfelder. Bei genauerer Betrachtung ist ersichtlich, dass der Groundhook-Faktor k_{gro} sich analog dem Dämpferstrom i_{a} im vorherigen Abschnitt verhält, sodass für diesen Faktor die gleichen präadaptiven Regelstrategien resultieren, siehe Abschnitt 5.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

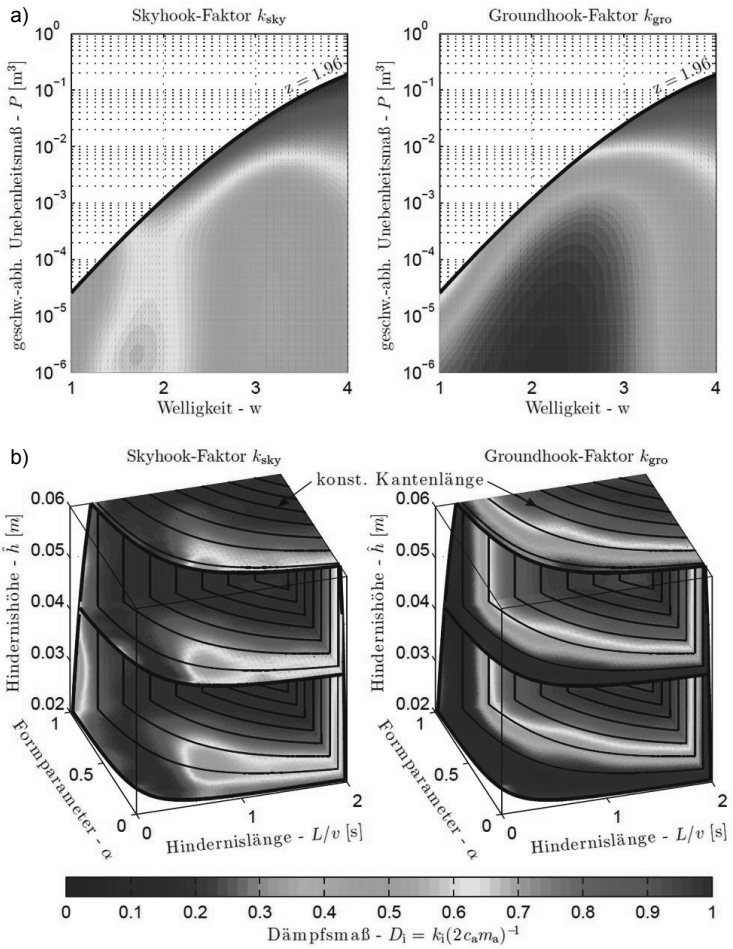


Bild 6: Optimierung des Hybrid-Reglers eines Viertelfahrzeugmodells (siehe Bild 3) mit realem Dämpferkennfeld nach Bild 2b bei der Fahrbahnanregung nach (3) (oben) und Einzelhindernisanregung nach (1) (unten)

Jedoch lassen sich auch hier prinzipielle Aussagen für eine optimale Parametrierung treffen, sodass analog der Vorgehensweise im vorherigen Abschnitt 5 für den Groundhook-Faktor

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

sich die folgenden präadaptiven Regelstrategien für semi-aktive Fahrwerksysteme mit einem Hybrid-Regler herleiten:

(3) Erhöhung des Skyhook-Faktors infolge (a) der Gefährdung der Fahrsicherheit, besonders bei einem hohen geschw.-abh. Unebenheitsmaß und Fahrbahnwelligkeit, und (b) niederfrequenter Einzelhindernisanregung, zu erkennen an einem großen Kanten-Hindernislängen-Verhältnis.

(4) Reduzierung des Skyhook-Faktors infolge (a) nicht kritischer Fahrsituationen, und (b) hochfrequenter Fahrbahnanregung bei niedrigen Fahrbahnwelligkeiten unabhängig von dem geschw.-abh. Unebenheitsmaß und niedrigen Kanten-Hindernislängen-Verhältnis.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag stellt eine Potenzialanalyse von prädiktiven Streckendaten zur Komfortsteigerung von Fahrzeugen mit geregelten Vertikaldynamiksystemen vor. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Optimierung eines adaptierbaren und geregelten Fahrwerkssystems am Beispiel eines Viertelfahrzeugmodells mit einem semi-aktiven Dämpfer. Es wurde gezeigt, dass mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens und der Auswertung verschiedener Fahrbahn- und Einzelhindernisanregungen ein optimaler Dämpferstrom bzw. eine optimale Parametrierung des Hybrid-Reglers appliziert werden kann. Anschließend erfolgte auf Basis der gewonnen Erkenntnisse die Vorstellung der resultierenden präadaptiven Regel- bzw. Fahrstrategien für das aufgezeigte adaptive und semi-aktive Fahrwerkssystem. Dabei resultiert trotz der unterschiedlichen Ansätze eine standardisierte Vorgehensweise.

Anhand der in diesem Beitrag hergeleiteten Regel- bzw. Fahrstrategien lassen sich für die Zukunft noch weitere Untersuchungen ableiten:

- Potenzialanalyse von prädiktiven Streckendaten zur Komfortsteigerung von Fahrzeugen mit langsam aktiven und vollaktiven Vertikaldynamiksystemen.
- Auswirkungen auf die in [3] vorgestellten präadaptiven Fahrwerkregelungskonzepte und dessen Straßenklassifizierung und Einzelhindernisdetektion.
- Umsetzung einer echtzeitfähigen Straßenklassifizierung und Einzelhindernisdetektion inkl. Straßenprofilschätzung [2] im Fahrzeug, siehe [14].

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[1] Yamamoto, M. ; Hashiguchi, M. ; Nakagawa, S. : *Chassis, Control Systems and Equipment*, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 67-69, 2013-2015.

[2] Noll, A. ; Ament, C. : *Accuracy and Robustness of Road Observers with Uncertainties for Reconstruction of the Road Elevation Profile*, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2016.

[3] Noll, A. ; Ament, C. : *Konzeption und Entwicklung eines Preview-Systems zur Verbesserung der Komforteigenschaften und der Reichweiteneffizienz eines Fahrzeugs mit geregelten Vertikaldynamiksystemen auf Basis von Backend-Daten*, 32. VDI/VW-Gemeinschaftstagung: Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren, Wolfsburg, 8.-9. November 2016.

[4] ISO 8608, *Mechanical Vibration - Road Surface Profiles - Reporting of Measured Data*, International Organization for Standardization, ISO 8608:1995(E), 1995.

[5] Koch, G. P. : *Adaptive Control of Mechatronic Vehicle Suspension Systems*, Technische Universität München, Diss., 2011.

[6] Bloomfield, P. : *Fourier Analysis of Time Series: An Introduction*, 2. Aufl. John Wiley & Sons, Inc., 2004 (Wiley Series in Probability and Statistics).

[7] Mitschke, M. ; Wallentowitz, H. : *Dynamik der Kraftfahrzeuge*, 5. Aufl. Springer Vieweg, 2014 (VDI-Buch).

[8] Zeller, P. : *Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch; mit 43 Tabellen*, 2. Aufl. Vieweg + Teubner, 2012 (ATZ-MTZ Fachbuch).

[9] Braun, H. ; Hellenbroich, T. : *Messergebnisse von Straßenunebenheiten*, Unebenheiten von Schiene und Straße als Schwingungsursache, Bd. 877, VDI-Verlag Düsseldorf, 1991, S. 47-80.

[10] Braun, H. : *Untersuchung von Fahrbahnunebenheiten und Anwendung der Ergebnisse*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1969.

[11] Venhovens, P. J. T. : *Optimal Control of Vehicle Suspensions*, Delft University of Technology, Diss., 1993.

[12] Schiehlen, W. ; Iroz, I. : *Uncertainties in Road Vehicle Suspensions*, Procedia IUTAM, Vol. 13, S. 151-159, Dynamical Analysis of Multibody Systems with Design Uncertainties, 2015.

[13] Mitchell, M. : *An Introduction to Genetic Algorithms*, Bradford Books, 1998.

[14] Noll, A. ; Ament, C. : *Straßenklassifizierung und Einzelhindernisdetektion für cloudbasierte vertikale Fahrwerksfunktionen*, 17. Internationale VDI-Tagung Reifen - Fahrwerk - Fahrbahn, Hannover, 25.-26. Oktober 2017.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Einfluss von Verkehrsteilnehmern auf die Online-Optimierung der Fahrtstrategie

Markus Eisenbarth, M. Sc., Dipl.-Ing. **Thorsten Plum**,
Prof. Dr.-Ing. **Jakob Andert**, RWTH Aachen University, Aachen

Kurzfassung

Die steigende Vernetzung und Automatisierung von Kraftfahrzeugen ermöglichen neue Freiheitsgrade insbesondere die urbane Mobilität effizienter zu gestalten. Dazu können die über eine Vehicle-to-X-Kommunikationsschnittelle bereitgestellten aktuellen Verkehrszustände in die Zukunft prädiziert und in einem Optimierungsproblem als Randbedingungen berücksichtigt werden. In diesem Beitrag wird hierfür ein modellbasierter Prädiktionsalgorithmus vorgestellt, der auf der Auswertung von Messfahrten basiert. Untersuchungen an einem Fallbeispiel haben gezeigt, dass der Prädiktionshorizont einen wesentlichen Parameter zur Reduktion des Energiebedarfs am Rad darstellt. Jedoch wird für ein Kreuzungsszenario schnell ein Sättigungspunkt erreicht, ab dem ein steigender Prädiktionshorizont nicht mehr zu einer Reduktion des Energiebedarfs führt. In einigen Situationen kann ein größerer Vorausschauhorizont sogar kontraproduktiv wirken.

Abstract

The increasing interconnectivity and automatization of vehicles allows for new degrees of freedom, especially concerning shaping the urban mobility more efficiently. Therefore, the current traffic situation, which is made available by a Vehicle-to-X communication interface, can be predicted into the future and can be considered as a boundary condition for optimization problem. In this article, a model based prediction algorithm will be introduced for this purpose, which is based on an evaluation of measurement runs. Analyses of a case study have shown that the horizon of prediction represents a significant parameter in reducing the demand for energy at wheels. However, the cross-section scenario soon reaches a saturation point from which on an increasing prediction horizon no longer leads to a reduction in the demand for energy. In some situations, a greater horizon in forecast even causes an increased demand for energy.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1. Einleitung und Motivation

Die digitale Vernetzung hat Einzug in die Automobilindustrie erhalten und wird auf dem Weg zum autonomen Fahrzeug zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen. Unter Vernetzung wird die Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander (V2V, Vehicle-to-Vehicle) sowie mit der Infrastruktur (V2I, Vehicle-to-Infrastructure), etwa mit Ampelanlagen, verstanden und als Vehicle-to-X-Kommunikation (V2X) zusammengefasst [1]. Während bisher oftmals Komfort- und Sicherheitsanwendungen im Fokus der Forschung standen [2], wird in diesem Beitrag untersucht, wie die V2X-Kommunikation dazu genutzt werden kann, den Energiebedarf eines automatisiertes Fahrzeugs in einem urbanen Verkehrsszenario zu reduzieren.

Für eine energieoptimale längsdynamische Fahrstrategie muss einmal aufgewendete kinetische Energie möglichst lange erhalten bleiben, ohne durch unnötige Bremsvorgänge in Wärme gewandelt zu werden. Im Straßenverkehr sind Bremsmanöver jedoch unvermeidbar. So können u.a. Änderungen des gesetzlichen Geschwindigkeitslimits, Kurven, Verkehrshindernisse wie Bremsschwellen, Kreuzungen mit oder ohne Verkehrsampel sowie ein langsames Vorderfahrzeug Bremsmanöver erfordern. In diesen Fällen sollte jedoch der Verzögerungsvorgang und die anschließende Beschleunigung möglichst energieeffizient durchgeführt werden. Daher müssen diese Ereignisse, idealerweise mit ihrem zukünftigen Einfluss auf das zu optimierende Fahrzeug, bekannt sein und als Randbedingung in einem Optimierungsproblem berücksichtigt werden. Gesetzliche Geschwindigkeitslimits, Kurvenradien zur Berechnung einer maximalen Kurvengeschwindigkeit und die Position von Verkehrshindernissen sind statische Größen und können aus digitalen Karten herausgelesen werden. Informationen über die Dauer von Ampelphasen können zukünftig über die V2I-Kommunikationsschnittstelle bereitgestellt werden. Sowohl für Verkehrskreuzungen, bei denen die Vorfahrtsregelung ohne Signalanlagen geregelt wird, als auch in Situationen, in denen ein langsameres Vorderfahrzeug die Ursache für einen Bremsvorgang darstellt, beeinflusst vor allem das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer maßgeblich die energieoptimale Fahrstrategie.

In diesem Beitrag wird daher ein Prädiktionsalgorithmus vorgestellt, der die zukünftige Geschwindigkeitstrajektorie von Verkehrsteilnehmern auf Basis von V2V-Informationen prädiziert (Kapitel 2.1). In Kreuzungssituationen ohne Ampeln wird auf Basis der prädizierten Geschwindigkeitsverläufe der auf die Kreuzung zufahrenden Fahrzeuge und den geltenden Vorfahrtsregeln eine virtuelle Verkehrsampel erzeugt (Kapitel 2.2), sodass ein Ampelassistent eine optimierte Geschwindigkeitstrajektorie berechnen kann (Kapitel 3). Die Untersu-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

chung der Algorithmen geschieht am Beispiel einer Kreuzungssituation mit realen Messdaten (Kapitel 4).

2. Prädiktionsalgorithmus des Umgebungsverkehrs

Um eine Verkehrskreuzung ohne Lichtsignalvorfahrtsregelung optimal zu befahren, müssen für einen ausreichend großen Vorausschauhorizont die zukünftigen Positionen der relevanten Verkehrsteilnehmer prädiziert werden. Dazu können Fahrer-Längsdynamikmodelle verwendet werden, die sowohl die Folgefahrt als auch die freie Fahrt der Verkehrsteilnehmer prädizieren können. Auf Basis dieser Vorhersagen kann ein Algorithmus für das zu optimierende Fahrzeug (Ego-Fahrzeug) entscheiden, wann die Kreuzung in Zukunft frei zu befahren ist oder von einem Fahrzeug mit Vorrang blockiert wird.

2.1 Erweiterung eines Fahrer-Folgemodells für die freie Fahrt

Zur Beschreibung des Verkehrszustands sind in der Verkehrsdynamik verschiedene Modellklassen bekannt. Sie werden anhand ihres Abstraktionsniveaus in mikroskopische, mesoskopische und makroskopische Modelle unterschieden [3]. Da für die Prädiktion einer Kreuzungssituation die Beschreibung der Geschwindigkeitstrajektorie der einzelnen Verkehrsteilnehmer erforderlich ist, bietet sich die Klasse der mikroskopischen Modelle an. Die bekanntesten Vertreter dieser Klasse sind das Wiedemann-Modell [4], das Intelligent Driver Model [5] und das Gipps-Modell [6]. Alle genannten Modelle haben gemein, dass ihre Stärke in der Beschreibung des Folgeverhaltens von Fahrzeugen liegt und hierbei bereits gute Übereinstimmungen mit dem Realverhalten aufweisen. Bei freier Fahrt zeigen diese Modelle jedoch meist ein unrealistisches Beschleunigungsverhalten [7] und sind somit nicht ohne Adaption für einen Prädiktionsalgorithmus geeignet. Da das Gipps-Modell aufgrund seiner Modellgleichungsstruktur gute Voraussetzungen für eine solche Erweiterung besitzt, wird dieses Modell für die weiteren Untersuchungen verwendet.

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

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

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Im Standardmodell sind sowohl die maximale Beschleunigung und Verzögerung als auch die maximale Geschwindigkeit Konstanten. Um weitere Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsgrenzen zu berücksichtigen, werden diese im Folgenden durch empirische Zusammenhänge zeit- und situationsabhängig ersetzt. Hierzu wurden zunächst mit einem Versuchsfahrzeug mehre innerstädtische Messfahrten durchgeführt. Das Versuchsfahrzeug wurde zu diesem Zweck mit einem GPS-Sensor und einer Kamera ausgestattet, um die Fahrzeugposition und die Verkehrssituation zu rekonstruieren. Während der Messfahrten wurden zusätzlich Fahrzeugdaten vom CAN-Bus, wie zum Beispiel die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit und -beschleunigung, mitprotokolliert. Die Auswertung der Messdaten hat gezeigt, dass neben den gesetzlichen Tempolimits $v_{max,TL}$ u.a. Kurven $v_{max,K}$ und Bremsschwellen $v_{max,Bs}$ weitere ortsabhängige Geschwindigkeitslimits darstellen. In Bild 1 sind exemplarisch für die Überfahrt einer Bremsschwelle drei Geschwindigkeitsverläufe über den Weg aufgetragen.

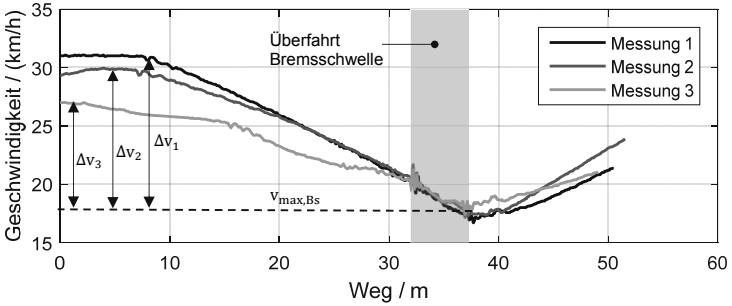


Bild 1: Ausgewählte Geschwindigkeitsverläufe für die Überfahrt über eine Bremsschwelle

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

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

Darüber hinaus konnte für Beschleunigungs- und Verzögerungsmanöver ein Zusammenhang zwischen der Differenzgeschwindigkeit Δv von End- und Startgeschwindigkeit identifiziert werden, welcher in Bild 2 visualisiert ist.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

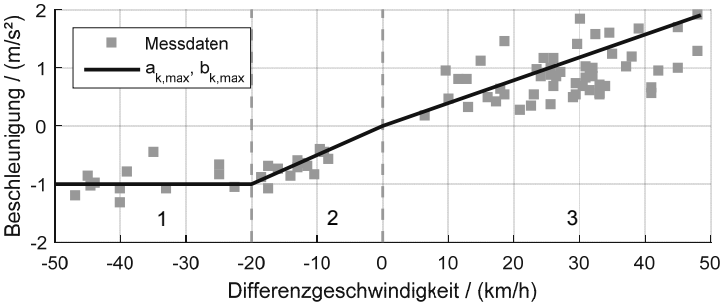


Bild 2: Darstellung der mittleren Beschleunigung in Abhängigkeit der Differenzgeschwindigkeit

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

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

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

Anhand des mit diesen Zusammenhängen erweiterten Gipps-Modells, den Informationen aus digitalen Karten und den aktuellen Positionen und Geschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmer können die zukünftigen Trajektorien der Verkehrsteilnehmer geschätzt werden.

2.2 Virtuelle Verkehrsampel

Bisherige Konzepte der virtuellen Verkehrsampel (VTL, engl. Virtual Traffic Light) sind in der Lage den Verkehrsfluss zu regeln, ohne dass eine physikalische Lichtsignalanlage erforderlich ist [8]. Stattdessen kommunizieren die Fahrzeuge via V2V-Kommunikation untereinander und handeln die Prioritäten selbstständig aus. Dabei ist es das Ziel, die Verkehrssicherheit zu verbessern und den Verkehrsfluss zu erhöhen. Im Gegensatz dazu werden in diesem Beitrag die Prioritäten nicht unter den Verkehrsteilnehmern verhandelt, sondern resultieren aus den bestehenden, klassischen Vorfahrtsregelungen.

Daher wird im Folgenden ein abgeändertes Konzept der VTL vorgestellt, dessen Aufgabe es ist, für den Vorausschauhorizont zu prädizieren, zu welchem zukünftigen Zeitpunkt die Kreu-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

zung frei befahrbar oder von einem anderen Fahrzeug blockiert ist. Der dazu verwendete Algorithmus kann in drei übergeordnete Schritte eingeteilt werden, die wiederum weitere untergeordnete Schritte beinhalten:

1. Vorberechnungen
2. Prädiktion und virtuelle Ampel für alle relevanten Fahrzeuge
3. Virtuelle Ampel für das Ego-Fahrzeug

Der erste Schritt, die Durchführung der Vorberechnungen, ist in Bild 3 anhand eines Beispielkreuzungsszenarios visualisiert. Hierbei befinden sich neben dem Ego-Fahrzeug drei weitere Fahrzeuge (A, B und C) in der Nähe einer Kreuzung, deren Vorfahrt mit Verkehrsschildern geregelt ist. Die Fahrzeuge tauschen über V2V-Kommunikation ihre aktuelle Positionen, Geschwindigkeiten und Richtungen sowie weitere Fahrzeugzustandsinformationen (z.B. den Status des Richtungsanzeigers oder der Bremsleuchte) aus.

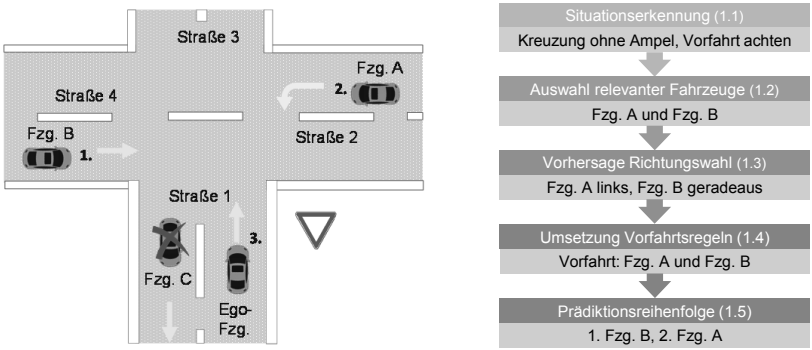


Bild 3: Beispielkreuzungsszenario zur Veranschaulichung der Vorberechnungsschritte für eine virtuelle Verkehrsampel

Auf Basis dieser Daten erfolgt zunächst eine Situationserkennung (1.1). Anhand von Routeninformationen und entsprechenden Kartendaten wird entschieden, ob auf der Route des Ego-Fahrzeugs innerhalb des Vorausschauhorizontes eine Kreuzung ohne Lichtsignalanlage existiert, und welche Vorfahrtssituation vorliegt. Liegt ein solches Kreuzungsszenario vor, wird anhand der Positionen und der Geschwindigkeitsvektoren der Fahrzeuge entschieden, ob diese als relevant einzustufen sind (1.2). In dem vorliegendem Beispiel sind nur die Fahrzeuge A und B relevant. Für diese Fahrzeuge wird anschließend die Richtung prädiziert, in der die Fahrzeuge die Kreuzung voraussichtlich überqueren werden (1.3). Dazu werden Statusinformationen wie der Fahrtrichtungsanzeiger und die aktuelle Geschwindigkeit ausgewertet. Zukünftig könnten zusätzlich Informationen aus digitalen Karten, wie die Abbiegewahr-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

scheinlichkeiten auf Basis von Straßenkategorien, berücksichtigt werden. In dem Beispielszenario wird das Fahrzeug A links abbiegen, und das Fahrzeug B die Kreuzung geradeaus überqueren. Diese Informationen sind erforderlich, um die Vorfahrtssituation (1.4) eindeutig festzustellen: Das Ego-Fahrzeug muss beiden kreuzenden Fahrzeugen Vorfahrt gewähren; Fahrzeug A muss beim Linksabbiegen Fahrzeug B Vorfahrt gewähren. Die Vorberechnungen schließen mit der Festlegung der Prädiktionsreihenfolge (1.5). Das nächste zu prädizierende Fahrzeug ist stets jenes, welches keinem anderen Fahrzeug Vorfahrt gewähren muss. Somit ergibt sich folgende Reihenfolge für das Beispielszenario: 1. Fahrzeug B, 2. Fahrzeug A.

In dem zweiten Schritt schließt sich gemäß der zuvor bestimmten Reihenfolge die sequentielle Prädiktion aller relevanten Fahrzeuge an. Es wird zunächst für jedes Fahrzeug angenommen, dass die Kreuzung zu jedem Zeitpunkt frei ist und somit keine Rücksicht auf andere Verkehrsteilnehmer genommen werden muss. Für die Prädiktion wird das zuvor beschriebene erweiterte Gipps-Modell verwendet. Die aktuelle Fahrzeugposition, -geschwindigkeit und -beschleunigung, sowie die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit werden als Rand-bedingungen berücksichtigt. Anschließend wird geprüft, ob zu einem Prädiktionszeitpunkt die Kreuzung bereits durch ein weiteres Fahrzeug blockiert war. Dazu wird die Kreuzung in acht Segmente unterteilt, die jeweils „frei“ oder „blockiert“ sein können (vgl. Bild 3).

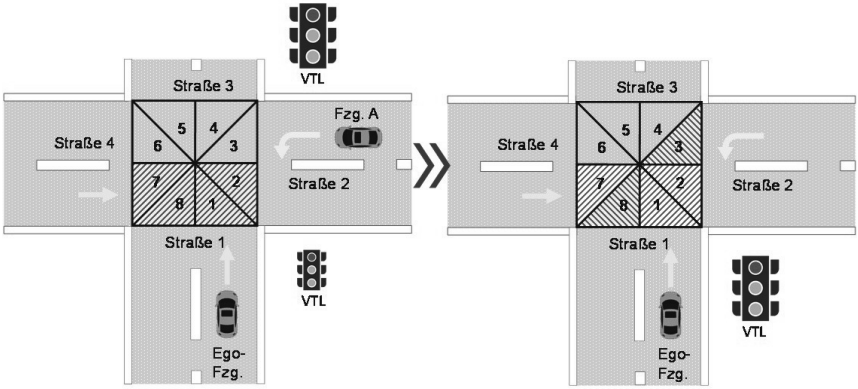


Bild 4: Beispielszenario „Vorfahrt-Achten“-Kreuzung mit virtueller Verkehrsampel

Diese Information ist in einer Logik-Matrix $\mathrm{L} \in \{0,1\}^{8\mathrm{xNp}}$ kodiert. Die Zeilen stehen jeweils für die Segmente 1 bis 8, die Spalten für die Prädiktionszeitschritte 1 bis zum

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Prädiktionshorizont Np. Der logische Wert $l_{S,T} = 1$ bedeutet, dass das Segment S zum Prädiktionszeitpunkt T frei befahrbar ist. Standardmäßig ist diese Matrix mit 1 befüllt. Befindet sich zum Zeitpunkt T bereits ein Fahrzeug in einem der Kreuzungssegmente, wird der entsprechende Eintrag auf $l_{S,T} = 0$ gesetzt. Darüber hinaus wird ein zeitlicher Sicherabstand von 2s vor und 1s nach dem kreuzenden Fahrzeug berücksichtigt. Ergibt die Prüfung, dass eines der Segmente zum Zeitpunkt des Befahrens T_{Seg} entgegen der Annahme bereits durch ein anderes Fahrzeug belegt ist, wird die Prädiktion entsprechend korrigiert. Dazu wird die Annahme getroffen, dass der Fahrer so lange seine Geschwindigkeit beibehält, bis er mit einer konstanten Verzögerung $b_{k,max}$ bis zum Stillstand bremsen kann. Basierend auf vorherigen Untersuchungen (vgl. Bild 2), wird angenommen, dass die Verzögerung von der Anfangsgeschwindigkeit abhängt. Der Startzeitpunkt der Verzögerung kann dann wie folgt berechnet werden:

$$t_{b,start} = T_{Seg} - \frac{v_{act}}{b_{k,max}}$$

Das Fahrzeug beschleunigt wieder, nachdem das blockierende Fahrzeug die Kreuzung verlassen hat und die Reaktionszeit des Fahrers verstrichen ist. Anhand des finalen prädizierten Geschwindigkeitsverlaufs können nun die Einträge in der VTL-Matrix L aktualisiert werden.

Wenn dieses Programm für alle Fahrzeuge durchlaufen wurde, wird in dem dritten Schritt der resultierende VTL-Zustand für das Ego-Fahrzeug prädiziert. Dazu werden die zu den zu über-querenden Kreuzungssegmenten entsprechenden Zeileneinträge der Matrix L (hier: 1,2,3,4) elementweise miteinander multipliziert. Es resultiert somit ein binärer Vektor mit Np Einträgen, der für jeden Prädiktionszeitschritt angibt, ob die Kreuzung frei („1“) oder blockiert ist („0“).

3. Modellprädiktive Regelung als Ampelassistent

Für die Wahl einer optimalen Fahrstrategie zum Befahren einer Kreuzung mit (virtueller) Verkehrsampel existieren bereits verschiedene Ansätze in der Literatur. Regelbasierte Ansätze [9] beanspruchen im Vergleich zu anderen Methoden nur wenig Rechenkapazität. Die resultierende Fahrstrategie ist jedoch im Allgemeinen kein globales Optimum. Gegensätzlich dazu garantiert die diskrete dynamische Programmierung [10] eine global optimale Fahrstrategie, jedoch ist sie aufgrund ihrer Komplexität problematisch hinsichtlich Echtzeitfähigkeit. Als guter Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Güte der Ergebnisse hat sich die modellprädiktive Regelung gezeigt [11], [12] und wird daher für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Das für diese Art von Optimierung erforderliche Zustandsraummodell ist wie folgt aufgebaut: Der Zustandsvektor x besteht aus den Größen Fahrzeugposition s, -geschwindigkeit v, und -beschleunigung a. Mit der Sollbeschleunigung $\mathrm{a_{soll}}$ als Stellgröße des Regelung ergibt sich die vollständige Zustandsraumgleichung zu:

$$\dot{\mathrm{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathrm{x} + \mathbf{B} \cdot \mathrm{u} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \mathrm{v} \\ \mathrm{a} \\ \dot{\mathrm{a}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\mathrm{T}_s} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathrm{s} \\ \mathrm{v} \\ \mathrm{a} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\mathrm{T}_s} \end{pmatrix} \cdot \mathrm{a_{soll}}$$

Durch die Bewertung der Zustände und der Stellengrößen anhand der Kostenmatrizen Q und R ergibt sich die Kostenfunktion J. Somit kann das zu lösende Optimierungsproblem in der Form eines quadratischen Programms formuliert werden:

$$\mathrm{J} = \min(\mathrm{X}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathrm{X} + \mathrm{U}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathrm{U})$$

$$\text{s.t. } \mathbf{A}\mathrm{x} \leq \mathrm{g}$$

Die Gewichtungsmatrizen werden so gewählt, dass Stellengrößen $\mathrm{a_{req}} > 0$ und der verbleibende Abstand zur Zielposition $\mathrm{s_{Ziel}} - s$ bestraft werden. Dadurch wird erreicht, dass sich das Fahrzeug seinem Zielort annähert und dabei unnötige Beschleunigungen und Verzögerungen vermieden werden. Dies entspricht der zuvor aufgestellten Forderung, einmal aufgewendete Energie möglichst lange zu erhalten. Mithilfe des Vektors g werden die Fahrzeuggeschwindigkeit und -beschleunig begrenzt. Darüber hinaus wird der Weg s so begrenzt, dass die Position der Ampel während der Rotphasen nicht überfahren werden kann. Der Algorithmus wurde so erweitert, dass wenn verschiedene Grünphasen theoretisch erreichbar sind, stets die erste Grünphase angesteuert wird.

4. Untersuchungen an einem Fallbeispiel

In der in diesem Beitrag verwendeten Kreuzungssituation (vgl. Bild 5) fahren drei Fahrzeuge (Ego-Fahrzeug, Fahrzeug A und B) in einer Tempo-30-Zone auf eine Kreuzung zu. Das Ego-Fahrzeug und das Fahrzeug A wollen diese geradeaus passieren, das Fahrzeug B links abbiegen. Das zu optimierende Fahrzeug muss dabei dem von rechts (Fahrzeug A) und von links (Fahrzeug B) kommenden Verkehr Vorfahrt gewähren. Zusätzlich muss das Fahrzeug A vor Erreichen der Kreuzung noch eine Bremsschwelle überfahren. Zur realitätsnahen Darstellung werden die Trajektorien der Fahrzeuge A und B durch Messungen repräsentiert. Diese wurden sequentiell mit demselben Messfahrzeug aufgezeichnet und für die Untersuchungen zeitlich übereinander gelegt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

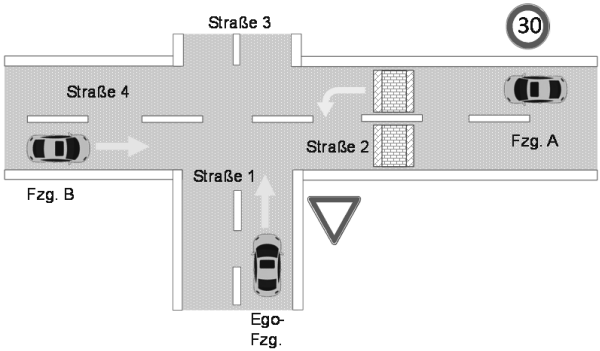


Bild 5: Schemenhafte Darstellung der betrachtenden Kreuzungssituation

Im Folgenden werden für drei Szenarien Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses verschiedener Prädiktionshorizonte (5s, 10s, …, 30s) auf den Energiebedarf am Rad durchgeführt. Das Szenario S0 stellt die Referenz dar. Hierbei wird angenommen, dass die Geschwindigkeitstrajektorien der Fahrzeuge A und B vollständig bekannt sind. Für die Szenarien 1 und 2 werden die vorgestellten Konzepte der Prädiktion und der virtuellen Verkehrsampel verwendet. Das Szenario 2 unterscheidet sich von dem Szenario 1 lediglich durch eine Verschiebung des Startpunkts des Fahrzeugs B um 5m näher zur Kreuzung, wodurch die Kreuzung 0.6s früher erreicht wird. In Bild 6 sind die zeitlichen Verläufe der Positionen und der Geschwindigkeiten des Ego-Fahrzeugs exemplarisch für den kleinsten (5s) und größten untersuchten Prädiktionshorizont (30s) sowie der Verlauf des realen Kreuzungszustands dargestellt. Aufgrund der geringen Unterschiede und zur vereinfachten Darstellung sind die Kreuzungszustände der beiden Szenarien zusammengefasst worden. Der Kreuzungszustand berücksichtigt zusätzlich zu der tatsächlichen blockierten Zeit einen Sicherheitsabstand von 2s vor und 1s nach jedem Fahrzeug. Es ist zu erkennen, dass die minimale Änderung der Startbedingung bereits große Auswirkungen auf die Trajektorie des Ego-Fahrzeugs hat. Im Szenario 1 wird für sämtliche Prädiktionshorizonte konstant die frühere Grünphase angesteuert. Im Gegensatz dazu wechselt im Szenario 2 die angesteuerte Grünphase für Prädiktionshorizonte größer 5s während der Fahrt hin und her. Für einen Prädiktionshorizont von 30s sind diese Wechsel im Diagramm markiert (W1, W2 und W3). Der erste Wechsel ist dadurch gekennzeichnet, das im Vergleich zum ersten Szenario stärker gebremst wird, um die spätere Grünphase zu erreichen (W1). Jedoch wird nach ca. 1 Sekunde der Bremsvorgang abgebrochen, um erneut die frühere Grünphase zu erreichen (W2). Der dritte Wechsel (W3) und das entsprechende Verzögern führen dazu, dass zu dem Zeitpunkt, wenn die Prä-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

diktion präzise genug ist, bereits so stark verzögert wurde, dass die frühe Ampelphase nicht mehr erreicht werden kann.

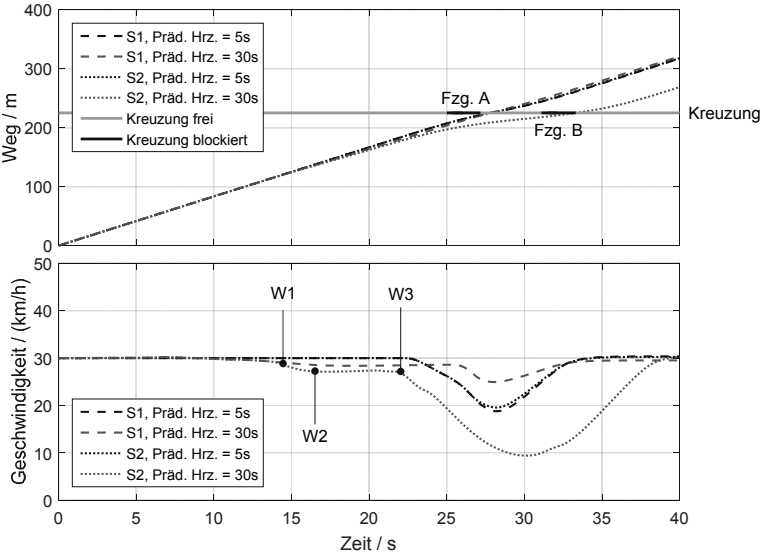


Bild 6: Weg-Zeit & Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm für die Szenarien 1 und 2 des Fallbeispiels

Dieses Verhalten spiegelt sich auch im Energiebedarf am Rad wider (vgl. Bild 7). Während für das Referenzszenario und das Szenario 1 der Energiebedarf zunächst bei steigendem Prädiktionshorizont sinkt und dann stagniert, steigt der Energiebedarf für Prädiktionshorizonte größer 5s stark an bevor er dann wieder leicht abfällt.

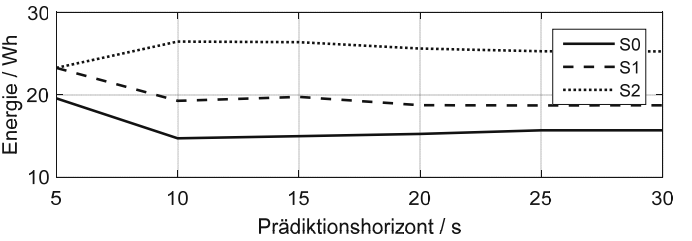


Bild 7: Verlauf des Energiebedarfs am Rad bei Variation des Prädiktionshorizonts

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen zum Befahren von Kreuzungssituationen ohne physische Verkehrsampeln durchgeführt. In einer Fallstudie konnte gezeigt werden, dass der Energiebedarf mit größerem Vorausschauhorizont zunächst gesenkt werden kann. In dem untersuchten Szenario sind ab einem Prädiktionshorizont von 20s keine signifikanten Einsparungen mehr zu verzeichnen. Aufgrund der Unsicherheit in der Prädiktion der Trajektorie der Verkehrsteilnehmer kann es hingegen zu Situationen kommen, in denen ein größerer Prädiktionshorizont sogar zu einem höheren Energiebedarf führt.

Daher konzentrieren sich die weiteren Forschungsarbeiten darauf, die Prädiktionsgenauigkeit zu verbessern. Hierzu werden u.a. lernende Ansätze, wie z.B. künstliche neuronale Netze, zur Prädiktion von Verkehrssituationen untersucht. Ebenfalls werden Möglichkeiten analysiert, die verbleibende Unschärfe innerhalb des Optimierungsproblems zu berücksichtigen.

6. Danksagung

Diese Ergebnisse sind im Rahmen des Hy-Nets Projekts, gefördert durch den Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) und das Land Nordrhein-Westfalen, entstanden.

EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum und Beschäftigung

EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

HY NETS

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literatur:

[1] Hartenstein, H. u. Laberteaux, K.: VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies. Oxford: Wiley-Blackwell 2010

[2] Biswas, S., Tatchikou, R. u. Dion, F.: Vehicle-to-Vehicle Wireless Communication Protocols for Enhancing Highway Traffic Safety. IEEE Communications Magazine 44 (2006) 1 S. 74-82

[3] Helbing, D.: Verkehrsdynamik, Berlin: Springer 1997

[4] Wiedemann, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Band 8, Berlin: Ifv 1974

[5] Treiber, M., Hennecke, A., u. Helbing, D.: Congested traffic states in empirical observantions and microscopic simulations. Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics 62 (2000) 2 S. 1805–1824

[6] Gipps, P. G.: A behavioural car-following model for computer simulation. Transportation Research Part B: Methodological 15 (1981) 2 S. 105–111

[7] Treiber, M. u. Kesting, A.: Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2010

[8] Ferreira, M., Fernandes, R., Conceição, H., Viriyasitavat, W., u. Tonguz, O. K.: Self-organized traffic control. Proceedings of the seventh ACM international workshop on VehiculAr InterNETworking (2010) S. 85-90

[9] Schubert, T.: Entwurf und Evaluierung einer prädiktiven Fahrstrategie auf Basis von Ampel-Fahrzeug-Kommunikationsdaten. Diplomarbeit. Dresden 2010

[10] Ye, Z., Plum, T., Pischinger, S., Stapelbroek, M., u. Pfluger, J.: Vehicle Speed Trajectory Optimization under Limits in Time and Spatial Domains. ATZ Fachtagung (2017)

[11] Asadi, B. u. Vahidi, A.: Predictive Cruise Control: Utilizing Upcoming Traffic Signal Information for Improving Fuel Economy and Reducing Trip Time. IEEE Transactions on Control Systems Technology 19 (2011) 3 S. 707-714

[12] Kural, E., Jones, S. Parilla, A., u. Grauers, A.: Traffic light assistant system for optimized energy consumption in an electric vehicle, Connected Vehicles and Expo (2014) S. 604-611

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Optimal Velocity Profile Generation for Semi-Autonomous Vehicles

Christoph Winter, Dr. **Ricardo de Castro**,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen

Kurzfassung

Diese Arbeit beschreibt die Optimierung von Geschwindigkeitsprofilen für (semi-) autonome Fahrzeuge. Der Fokus der Optimierung liegt auf dem Kompromiss zwischen zeit- und energieoptimalen Geschwindigkeitsprofilen. Dieser Kompromiss kann direkt durch den Fahrer gewählt werden. Mit Hilfe von dynamischer Programmierung wird das globale Optimum der komplexen Optimierung mit nichtlinearen Nebenbedingungen, die auf den physikalischen Beschränkungen des Fahrzeugs basieren, gefunden. Die Planung der Geschwindigkeitsprofile zusammen mit einem online Bahnplaner dient als Vorgabe für die Pfadfolgeregelung des Fahrzeugs, welche automatisiertes Fahren ermöglicht. Die Effektivität des vorgestellten Ansatzes wird durch numerische Simulationen gezeigt.

Abstract

This work describes the optimization of velocity profiles for the usage in (semi-) autonomous driving. The focus of the optimization lies on the trade-off between time and energy optimal velocity profiles. This trade-off can be directly chosen by the driver. With help of a dynamic programming framework the global optimum of the complex optimization with nonlinear constraints based on the vehicles physical limits is found. The velocity profile generation together with an online path planner serves as an input to the vehicle's path following control, allowing for automated driving. The effectiveness of the proposed approach is shown via numerical simulations.

1. Introduction

The main focus of this work consists in the optimal generation of velocity profiles for semi-autonomous vehicles, e.g. the DLR's robotic electric vehicle research platform ROboMObil (ROMO) [1]. We are particularly interested in investigating how the driver's longitudinal demands, i.e. his preference on how fast the car should be driven along the road, can be integrated into the optimal generation of the velocity profile. In manually operated vehicles, the throttle and braking pedals have been the dominant mechanism to interpret the driver's longi-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

tudinal demands. For example, the displacement of the throttle or braking pedal produced by the driver is normally mapped into an engine torque or braking pressure setpoint. More recently, with the advent of (Adaptive) Cruise Control technologies, the driver started to have the possibility to digitally pre-define velocity setpoints for the vehicle [2], which then can be automatically modified accordingly to the velocity of preceding vehicles. With the increased automation of the vehicle, new ways to interpret the longitudinal driving demands are emerging. Mostly visual, acoustic or haptic feedback for the driver is used to influence the driving behaviour towards a calculated optimal velocity setpoint [3].

In this work, we tackle this problem from a different perspective. We assume that the speed profile for the vehicle is generated by an optimization framework. This means that an optimization problem is formulated, containing two main performance metrics in the cost function: on the one hand the journey time J_T and on the other hand the energy consumption J_E. These two terms are then combined into an overall cost function J using the trade-off factor $\epsilon \in [0,1]$:

$$J = \epsilon J_T + (1-\epsilon) J_E \,. \tag{1}$$

Our main proposal consists in asking the driver to directly define the trade-off factor ϵ. For example, if the driver selects $\epsilon = 1$, the vehicle should travel as fast as possible throughout the journey. In contrary, by selecting $\epsilon = 0$, minimization of energy consumption is requested, which would make the vehicle eventually come to a standstill without further constraints. A value in the range $(0,1)$ provides a trade-off between the two performance goals, which the driver can directly explore to adapt the vehicle's speed profile to his preferences.

A similar approach to let the driver choose between fast and slow trajectories was presented in [4]. There the driver manipulates the overall travel time which is incorporated as an addi-

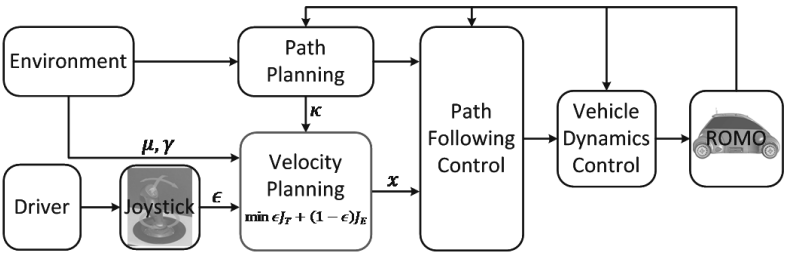


Fig. 1: Schematic showing the structure of the entire motion planning framework of the RObоMObil, with tyre-road friction coefficient μ, road slope γ, curvature κ and velocity x.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

tional constraint in the optimization problem. The travel time chosen by the driver then indirectly influences the energy consumption. The resulting optimization problem from [4] is nonlinear and the numerical solver is not able to ensure global optimal solutions. This contrasts with the approach investigated in this work, based on dynamic programming, which provides global optimal results for this nonlinear problem.

Fig. 1 shows a schematic of the motion planning framework of the ROboMObil, where the velocity profile generation (marked in red) together with the online path planner [5] serves as an input to the vehicle's path following control [6]. Thereby, the velocity planning module receives the driver's preference ϵ via joystick input, the path curvature κ from the path planner, and environmental information, such as the tyre-road friction coefficient μ and the slope angle of the path γ. Next, the optimized velocity profile x, as well as the planned path, serves as a demand for the path following control, which determines the motion demands of the vehicle dynamics control [7]. The proposed speed profile generation mechanism can also be seen as an advanced driver assistance system (ADAS), which would forbid the driver from requesting unfeasible or potentially dangerous velocity demands. It can also be used in fully autonomous driving as an interface to acquire the driver's velocity preferences which might vary over the journey.

2. Method Description

2.1. Mathematical Problem Formulation

In this section we discuss the formulation of the optimization problem for the velocity profile generation. It includes the cost function and constraints resulting from modelling of the physical interaction between the vehicle and its environment. Let us consider the vehicle's longitudinal dynamics in the time-domain as

$$m\dot{x} = mu - F_{\mathrm{roll}} - F_{\mathrm{down}} - F_{\mathrm{air}}\,, \tag{2}$$

where x is the vehicle longitudinal velocity, u the acceleration provided by the powertrain (i.e. electric motors and braking system), m the vehicle mass and the driving resistance containing: F_{roll} the rolling resistance, F_{down} the downhill force and F_{air} the air drag.

For the velocity profile generation we consider the arc length s of the path as the independent variable instead of time t. Since environmental information as well as the path description is described with respect to the arc length this simplifies the path and velocity planning. The generation of the desired vehicle's path is described in [5] and is not addressed in this work. With help of the following change of the independent variable

$$\dot{x} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}s} \cdot \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}s} x \tag{3}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

the longitudinal dynamics from (2) can be expressed in space-domain as

$$mx\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}s} = mu - F_{\mathrm{roll}} - F_{\mathrm{down}} - F_{\mathrm{air}}\,. \tag{4}$$

The motion of the vehicle is constrained by arc-length-dependent upper and lower limits. Actuation constraints are expressed as $u_{\min}(s) \le u(s) \le u_{\max}(s)$, where $u_{\min}$ and $u_{\max}$ are the minimum and maximum longitudinal acceleration achievable by the powertrain. Those limits also can be set lower than the physical limitation to satisfy comfort requirements. Additional information about the upcoming path is important to determine suitable velocity limits along the path. Therefore, the slope angle of the path $\gamma(s)$, speed limits along the road, and the path curvature $\kappa(s)$ in dependency of the arc length s are assumed to be known in advanced from the path planning module. The velocity constraints due to physical limits of the vehicle origin from two relations: On the one hand, the maximum lateral and longitudinal acceleration is constrained by the available tire-road friction according to the well-known friction circle [8]

$$a_{\mathrm{lat}}(s)^2 + u(s)^2 \le \left(\mu(s) g \cos\big(\gamma(s)\big)\right)^2, \tag{5}$$

where the combination of lateral acceleration a_{lat} and longitudinal acceleration u has to be less or equal to the physical maximum acceleration $a_{\max}$ with a given friction coefficient μ, slope angle γ and the gravitational force g. On the other hand, the lateral acceleration is determined by the velocity x and the curvature κ along the path as in $a_{\mathrm{lat}}(s) = \kappa(s) \cdot x(s)^2$. Combining those two relations leads to the following velocity-dependent constraint:

$$(\kappa(s) \cdot x(s)^2)^2 \le \left(\mu(s) g \cos\big(\gamma(s)\big)\right)^2 - u(s)^2\,. \tag{6}$$

Furthermore, there are velocity limits based on traffic rules and comfort criterions, which are given by $x_{\min}(s) \le x(s) \le x_{\max}(s)$, with the minimum velocity $x_{\min}$ and the maximum velocity $x_{\max}$, both with respect to legal limits or the drivers preference. The optimization problem has additional boundary conditions for the start and end values of the velocity. The initial speed is set to $x(0) = x_{\mathrm{start}}$ and the desired final speed $x(s_{\mathrm{f}})$ at arc length s_{f} needs to stay in the interval $x(s_{\mathrm{f}}) \in [x_{\mathrm{f,min}}, x_{\mathrm{f,max}}]$.

As explained in Section 1, we are interested in investigating trade-offs between travel time and energy consumption. Therefore, the overall travel time J_T as cost function is obtained as

$$J_T = \int_0^{t_{\mathrm{f}}} \mathrm{d}t = \int_0^{s_{\mathrm{f}}} \frac{1}{x}\mathrm{d}s\,, \tag{7}$$

with the final time of the velocity profile t_{f} and the overall arc length $s(t_{\mathrm{f}}) = s_{\mathrm{f}}$. The energy consumption as the second part of the cost function is determined as follows:

$$J_E = \int_0^{s_{\mathrm{f}}} \frac{mu^2}{\eta(u,x)}\mathrm{d}s\,, \tag{8}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

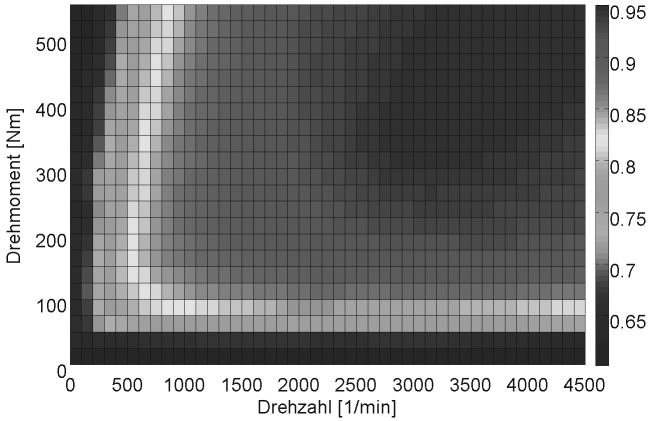


Fig. 2: Efficiency map of a permanent magnet synchronous motor (PowerPhase 100 Traction System, UQM).

where η is the motor efficiency in dependency of the desired acceleration u and vehicle speed x. Note that to (indirectly) penalize the energy, a quadratic acceleration term was used in the cost function as applied in the field of robotics [9] as well as in autonomous driving [10]. This quadratic term prevents chattering problems of the DP solver. The cost function is weighted with the efficiency of the traction motor to penalize inefficient operating points. The efficiency of the motor is represented by an efficiency map of a permanent magnet synchronous motor (see Fig. 2). The motor torque τ and the rotational speed ω required to calculate the efficiency from the map are determined from x and u. Here it is assumed that only the electric motor and no friction brake is utilized for braking. In addition, a single electric motor is considered, otherwise a control allocation describing the distribution of the desired acceleration to individual motor torques has to be taken into account for the cost function calculation.

The above relations were discretized using a forward Euler approximation and a constant acceleration between arc length nodes is assumed. The resulting discrete optimization problem of finding an optimal velocity profile for the vehicle can be formulated as follows:

$$\min_{u} \epsilon J_T + (1-\epsilon) J_E$$

$$\approx \min_{u_k} \sum_{k=0}^{N} \underbrace{\epsilon \frac{1}{x_k} \Delta s_k + (1-\epsilon) \frac{m u_k^2}{\eta_k(u, x_k)} \Delta s_k}_{g_k(u_k, x_k)} \tag{9a}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$\text{s.t. } x_{k+1} = x_k + \frac{\Delta s_k}{m x_k}\left(m u_k - F_{\text{roll,k}} - F_{\text{down,k}} - F_{\text{air,k}}\right) = f(u_k, x_k) \tag{9b}$$

$$u_{\min,\text{k}} \le u_k \le u_{\max,\text{k}}, \qquad x_{\min,\text{k}} \le x_k \le x_{\max,\text{k}}$$

$$\left(|\kappa_k| x_k^2\right)^2 \le \left(\mu_k g \cos(\gamma_k)\right)^2 - u_k^2$$

$$x_0 = x_{\text{start}}, \qquad x_N \in [x_{\text{f,min}}, x_{\text{f,max}}]$$

where $x_k = x(s_k)$, $u_k = u(s_k)$ etc. state the discretised variable at node k of the overall $N+1$ discrete arc length nodes with a spacing of Δs_k. Thereby the cost function $g_k(u_k, x_k)$ represents the driver defined trade-off (1) and $f(u_k, x_k)$ describes the state space difference equation.

As mentioned before, the simultaneous reduction of both cost terms J_T and J_E is contradictory to each other and therefore the optimization (9) yields a point on a Pareto-front, which is defined by a varying ϵ from 0 to 1. In our case the optimization problem requires only one state variable x since for example no gear shifting has to be taken into account for an electric drivetrain and only one input variable u. This reduced number of states and inputs is important to ensure that the problem can be solved efficiently in real-time.

2.2. Dynamic Programming

The optimization problem of the previous section is already formulated in a discrete way, which makes it well suitable for the use of dynamic programming (DP) [11] as a numerical solver. An important advantage of DP lies in its capability to handle nonlinear cost-functions and constraints, while guaranteeing global optimal solutions. The dynamic optimization problem is solved with the help of the following recursive equation starting from the end state x_N and $k = N-1, \dots, 0$

$$J_N(x_N) = g_N(u_N, x_N)$$
$$J_k(x_k) = \min_{\text{s.t. (9b)}} \left\{ g_k(u_k, x_k) + J_{k+1}\left(f(u_k, x_k)\right) \right\}. \tag{10}$$

The computational effort for solving the problem with dynamic programming strongly depends on the number of states and the number of nodes along the considered path length that is optimized. To enable the driver to command the trade-off factor ϵ it is important to achieve a real-time capable implementation of the DP solver.

For an efficient solving of the optimization problem a size reduction is important. The state space as well as the input space can be reduced by constraining it to only feasible values regarding the constraints in (9b). An example of the resulting state space restricted by various constraints is depicted in Fig. 3. These constraints include: 1. maximum longitudinal ac-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

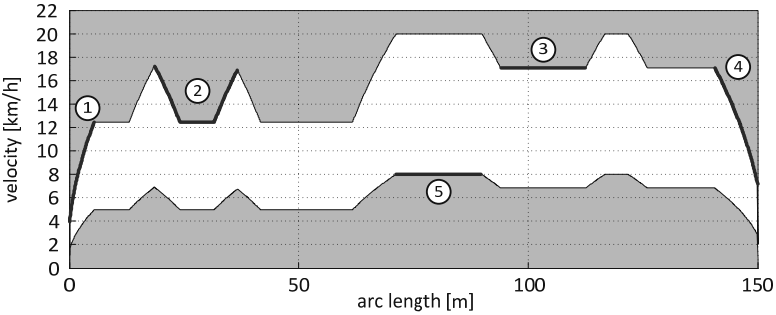


Fig. 3: Reduced state space with consideration of velocity and longitudinal and lateral acceleration constraints.

celeration $u_{\max}$, 2. maximum lateral acceleration $a_{\text{lat.max}}$, 3. maximum velocity $x_{\max}$, 4. minimum longitudinal acceleration $u_{\min}$ and 5. minimum velocity $x_{\min}$ (e.g. 40 % of $x_{\max}$). Furthermore, the presented velocity profile generation is integrated with an online path planning framework [5], [12] which is able to react to environmental changes. The possibility to easily apply nonlinear constraints to the optimization problem can be used to include those changes into the velocity optimization problem. One possible environmental condition that directly affects the velocity generation is the tyre-road friction coefficient μ. The change in the tyre-road friction coefficient $\mu(s)$ in dependency of arc length s directly influences the maximum feasible velocity $x_{\max}(s)$ in the DP algorithm. With the help of (6) the upper bound of the state space $x_{\max}(s)$ can be lowered if an area with a low friction coefficient μ is detected. In the results in Section 3.3 an example of this adaption of the velocity profile to environmental changes is shown.

3. Results

3.1. Real-Time Capability

In a (semi-) autonomous vehicle the motion demand has to be determined while the vehicle is moving to be able to react to environmental changes, in contrast to a pre-planned motion. Consequently, a real-time implementation of the velocity planning algorithm is necessary. Similar to [13], we consider a computation time of $0.1\ s$ as a threshold for real-time capability of the algorithm. This threshold is also constrained by the vision based environment perception of the ROboMObil [14] and is marked with a red dashed line in Fig. 4. The DP problem as described in Section 2 is implemented in Matlab and solved using the DP Toolbox [15], which we modified to handle constraints in form of $x \leq x_{\max}(s,u)$ that are not only dependent on the arc length but also on the input u. Fig. 4 shows the computation time needed to solve

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

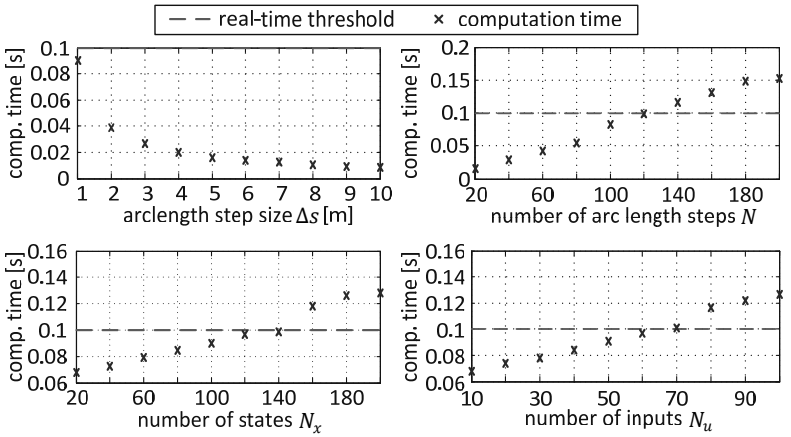


Fig. 4: Computation time of the DP algorithm depending on different parameters as the step size along the arc length Δs, the number of arc length steps N, the number of steps in the states grid N_x and the number of steps in the input grid N_u (default values: $\Delta s = 1\,\mathrm{m}$, $N = 110$, $N_x = 100$ and $N_u = 50$).

the DP problem depending on individual problem parameters (step size along the arc length Δs, number of arc length steps N, number of steps in the states grid N_x and number of steps in the input grid N_u) while the other quantities are held constant. The default setup for measuring the computation time is $\Delta s = 1\,\mathrm{m}$, $N = 110$ (regarding a 110 m long path), $N_x = 100$ and $N_u = 50$ on an Intel i7 quad-core processor with 2.8 GHz.

As can be seen in Fig. 4, the step size Δs along the arc length of the given path has the highest impact on the computation time with an exponential dependency. All other parameters have approximately a linear dependency in the computation time. For a real-time implementation it is critical to choose an appropriate step size Δs to get a high accuracy of the computed velocity profile along the arc length and a sufficiently low computation time. The DP problem remains feasible within our computation time threshold for $\Delta s \geq 1\,\mathrm{m}$. This is valid even with the high density of the state-space discretisation.

3.2. Trade-Off Velocity Profiles

After discussing the computational effort, in this section we show the results of the velocity profile generation using the DP method. To show the impact of the driver's choice on the trade-off parameter, various velocity profiles for the same test track (see Fig. 6a) are determined. Thereby, the trade-off parameter is varied from $\epsilon = 0$ to $\epsilon = 1$ in steps of 0.1. The upper plot of Fig. 5 shows the resulting family of curves of the velocity for the test track. The

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

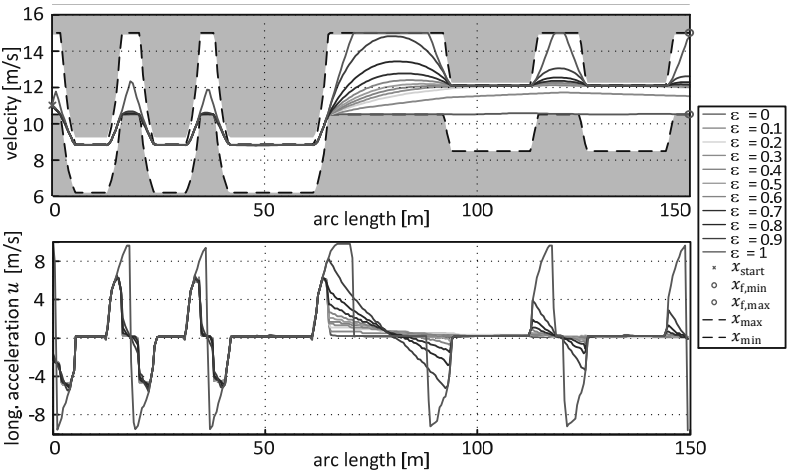


Fig. 5: Velocity profiles for a varying trade-off parameter ϵ within the constrained state-space and the corresponding longitudinal accelerations.

lower and upper bounds of the velocity are marked with black dashed lines, as well as the start and end values of the velocity profile are marked in red in Fig. 5. The corresponding longitudinal acceleration u is shown in the lower plot of Fig. 5 for the varying trade-off parameter. During the optimization all constraints of the problem are satisfied.

Fig. 6b depicts the resulting Pareto-front of the two cost criterions, the normalized journey time $J_T/J_T(\epsilon = 0)$ and the normalized energy consumption $J_E/J_E(\epsilon = 1)$, for the different trade-off parameters. Our proposal is that the driver can freely choose the trade-off parameter along this Pareto-front while driving. The extreme cases of a time optimal velocity profile ($\epsilon = 1$) and an energy optimal profile ($\epsilon = 0$) constrain the possible trade-off solutions.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3.3. Varying tyre-road friction coefficient

As introduced in Section 2.2, the presented framework is able to adjust the constraints of the velocity profile to environmental changes. This is helpful to always maintain the computed velocity profile within the physical limits of the vehicle, also under varying road conditions. In the following investigation a road turn with variable friction coefficient μ, e.g. resulting from wet or icy road conditions, is used (see Fig. 7a). The turn consists of straight segments at the

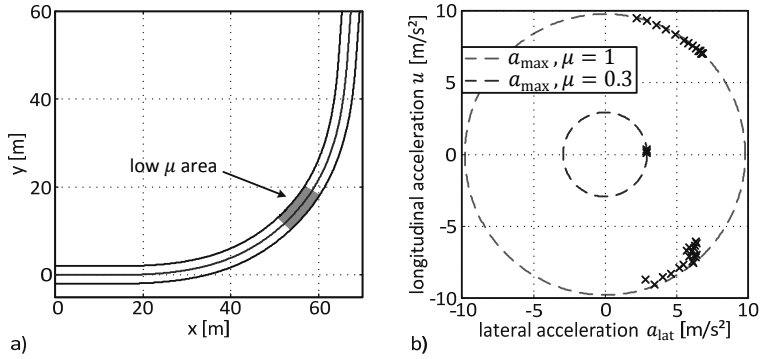


Fig. 7: a) Visualisation of the path of a single road turn (minimum radius of 37 m) with the low μ area marked grey. b) Friction circle of the acceleration while driving through the turn (for $s \in [26\,\text{m}, 82\,\text{m}]$) with the physical acceleration limits $a_{\max}$ as dashed lines.

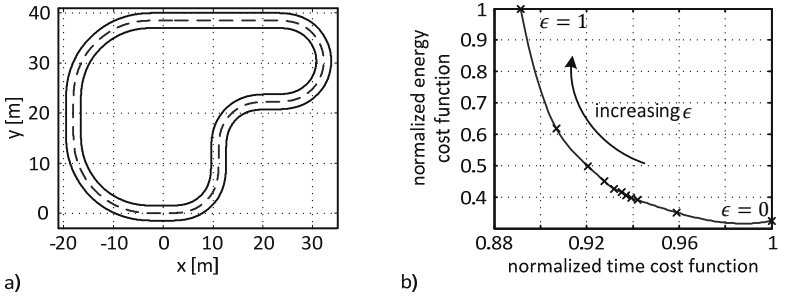


Fig. 6: a) Test track for the velocity profile generation. b) Pareto-front of the two normalized energy and time cost criterions.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

beginning and the end, a circular arc with a radius of 37 m in the middle and clothoids joining the straight segments and the arc segment.

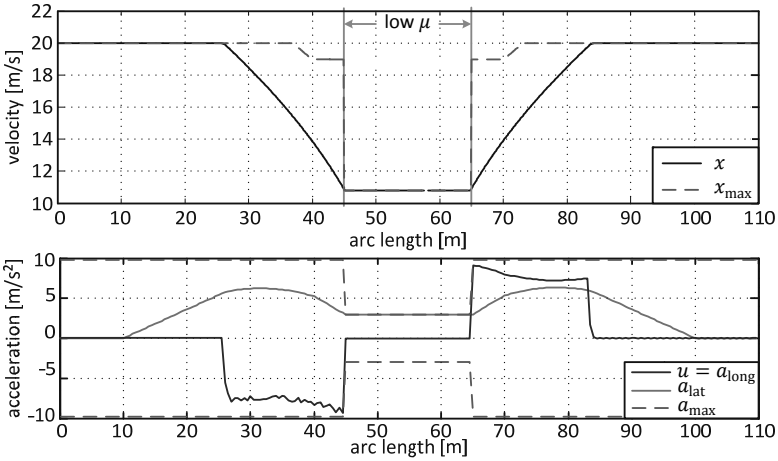


Fig. 8: Velocity profile and upper velocity bounds of a road turn with a low μ area and a friction coefficient of $\mu = 0.3$ in the upper plot with the corresponding longitudinal and lateral acceleration u and a_{lat} and its combined limit $a_{\max}$ in the lower plot.

The upper plot in Fig. 8 shows the optimal velocity profile (marked with a solid black line) corresponding to the path depicted in Fig. 7a. It can be seen clearly that the lower friction coefficient in the turn lowers the maximum lateral acceleration and thereby the maximum stable velocity $x_{\max}$ within the turn (marked with a red dashed line in the upper plot of Fig. 8). The DP algorithm shows an anticipatory behaviour by braking approximately 20 m before the low μ area to avoid excessive lateral acceleration during this slippery section. The step in the upper bound of the velocity profile is handled well by the DP algorithm and a smooth velocity profile for $\epsilon = 1$ within its acceleration bound is computed (see the lower plot of Fig. 8). The DP algorithm fully exploits the physical limits (marked as dashed lines for different μ values in Fig. 7b) to achieve a time optimal solution, as indicated by the friction circle in Fig. 7b. The points corresponding to the part of the turn with constant velocity (before $s = 26\ \text{m}$ and after $s = 82\ \text{m}$) are left out to focus on the non-zero acceleration phases. In summary, a safe velocity profile is always generated even under changing road conditions. Although not addressed in this work, the required data of the road surface friction coefficient could be estimated using on-board sensors, e.g. with the help of vision sensors, or acquired via external sources such as car-to-infrastructure communications.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4. Conclusion and Future Work

The presented velocity profile generation algorithm is able to determine the global optimum of a complex optimization problem with nonlinear constraints with the help of dynamic programming. Thereby, the optimization considers a trade-off between time and energy optimal velocity profiles. This trade-off is directly chosen by the driver. Furthermore, the velocity planning is able to take environmental changes, e.g. a variation of the tyre-road friction coefficient, into account by incorporating an adapted maximum velocity into the optimization constraints. As a result, a safe velocity profile is always determined regarding the physical limits of the vehicle.

Future work will include the implementation of the velocity profile generation on the real-time system of the ROboMObil and its experimental validation. In addition, the combination of the velocity profile generation and the online path planning into a single optimization problem will be investigated.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Bibliography

[1] Jonathan Brembeck et al., "ROMO – The Robotic Electric Vehicle," in *International Symposium on Dynamics of Vehicle on Roads and Tracks*, 2011.

[2] Bernhard Knauder, Michael Karner, and Markus Schratter, "Predictive longitudinal vehicle control based on vehicle-to-infrastructure communication," in *International Conference on Connected Vehicles and Expo*, Vienna, 2014, pp. 258-263.

[3] Carina Fors, Katja Kircher, and Christer Ahlström, "Interface design of eco-driving support systems – Truck drivers' preferences and behavioural compliance," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 58, pp. 706 - 720, 2015.

[4] Thijs van Keulen, Bram de Jager, Darren Foster, and Maarten Steinbuch, "Velocity trajectory optimization in hybrid electric trucks," in *American Control Conference (ACC), 2010*, 2010, pp. 5074-5079.

[5] Christoph Winter, Peter Ritzer, and Jonathan Brembeck, "Experimental Investigation of Online Path Planning for Electric Vehicles," in *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2016, pp. 1403-1409.

[6] Peter Ritzer, Christoph Winter, and Jonathan Brembeck, "Experimental validation of geometric path following control with demand supervision on an over-actuated robotic vehicle," in *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Gothenburg, 2016, pp. 539-545.

[7] Ricardo de Castro, Tilman Bünte, and Jonathan Brembeck, "Design and Validation of the Second Generation of the Robomobil's Vehicle Dynamics Controller," in *Proceedings of the 24th Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD 2015)*, 2016.

[8] Hans Pacejka, "Tyre and Axle Characteristics," in *Tire and Vehicle Dynamics*.: Elsevier, 2006, p. 5.

[9] Diederik Verscheure, Bram Demeulenaere, Jan Swevers, Joris De Schutter, and Moritz Diehl, "Time-Optimal Path Tracking for Robots: A Convex Optimization Approach," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 54, no. 10, pp. 2318-2327, 2009.

[10] Ricardo de Castro, Mara Tanelli, Rui Esteves Ara, and Sergio Matteo Savaresi, "Minimum-Time Path-Following for Highly Redundant Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 487-501, March 2016.

[11] Richard Bellman and Stuart Dreyfus, *Applied Dynamic Programming*. Princeton: Princeton Univ. Press, 1962.

[12] Jonathan Brembeck and Christoph Winter, "Real-time capable path planning for energy management systems in future vehicle architectures," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2014, pp. 599-604.

[13] Erik Hellström, Maria Ivarsson, Jan Aslund, and Lars Nielsen, "Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption," *Control Engineering Practice*, vol. 17, no. 2, pp. 245 - 254, 2009.

[14] Alexander Schaub, Juan Carlos Ramirez de la Cruz, and Darius Burschka, "Autonomous Parking using a Highly Maneuverable Robotic Vehicle," in *IFAC World Congress*, vol. 19, 2014, pp. 2640-2645.

[15] Olle Sundstrom and Lino Guzzella, "A generic dynamic programming Matlab function," in *2009 IEEE Control Applications, (CCA) Intelligent Control, (ISIC)*, 2009, pp. 1625-1630.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Adaption des Fahrerverhaltens in Abhängigkeit der Fahrsituation durch intelligente Fahrstrategien

Individual driving strategy for an improved energy-efficient driving experience

Dipl.-Ing. **René Großmann**, Sindelfingen;
Dipl.-Ing. **Tom Gothan**, Prof. Dr.-Ing. **Bernard Bäker**,
Technische Universität Dresden, Dresden

Kurzfassung

Die Reduktion des Energieverbrauchs und der damit verbundenen Fahrtkosten ist der Wunsch vieler Autofahrer. Zusätzlich möchten sie entspannt und sicher ans Ziel gelangen. Fahrstrategien kombinieren beide Anforderungen. Sie planen eine verbrauchseffiziente Geschwindigkeit für den vorausliegenden Streckenverlauf, die von einer adaptiven Geschwindigkeitsreglung umgesetzt werden kann. In diesem Beitrag wird ein Lösungsansatz präsentiert, der die Praxistauglichkeit und Akzeptanz von Fahrstrategien durch die Anpassung der Sollgeschwindigkeit an den Fahrer und die Steigerung der Prädiktionsgüte durch eine lernende Datenbasis verbessert.

Abstract

The majority of drivers requires an improved fuel efficiency to reduce travel costs. Additionally, they want to reach the destination in a convenient and secure way. Driving strategies link both requirements. They calculate an energy-efficient speed trajectory for the route ahead, which can be applied by an adaptive cruise control. This paper proposes an approach that improves the practicability and acceptance of driving strategies by adopting the driver behavior to create a target speed and increasing the quality of the prediction by a learning data base.

1. Einführung

Die bewusst energie- und kostenoptimale Überwindung räumlicher Distanzen ist ein Grundbedürfnis vieler Verkehrsteilnehmer. Gleichzeitig hält der Trend an, dass ein Großteil des täglichen Mobilitätsbedarfs mit dem PKW abgedeckt wird. So beträgt der prozentuale Anteil des motorisierten Individualverkehrs (Modal Split) im Personenverkehr in Deutschland 80 %

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[1]. Der hohe Anteil des Individualverkehrs verdeutlicht den Wunsch der Verkehrsteilnehmer nach einem flexiblen und für sie stets verfügbaren Transportmittel, obwohl der ÖPNV auf Kurzstrecken und in urbanen Gebieten signifikante Kostenvorteile aufweist. Auf die Anforderungen an eine energieeffiziente und umweltschonende individuelle Mobilität haben die Fahrzeughersteller einerseits mit verbrauchsreduzierenden Maßnahmen für den herkömmlichen Antriebsstrang reagiert und andererseits hybride bzw. vollelektrische Antriebe entwickelt.

Der Energieverbrauch eines Fahrzeugs wird zusätzlich zu den Fahrzeugeigenschaften (z. B. Bauform, Antriebskonfiguration, Masse) von der Fahrstrecke, den vorherrschenden Umgebungsbedingungen, der Fahrweise sowie dem lokalen Verkehrszustand beeinflusst. Für die Adaptation des Fahrzeugs an die aktuellen Gegebenheiten erfassen fahrzeuginterne Sensoren die Umgebung und ermöglichen Fahrerassistenzsystemen (FAS) unter teilweiser Einbeziehung externer Informationsquellen wie Verkehrsinformation die Anpassung der Fahrstrecke und des Antriebsstrangs [2-4]. Einen Forschungsschwerpunkt bilden hierbei Betriebs- und Fahrstrategien, deren Funktionen in Abschnitt 2 näher betrachtet werden.

Einen weiteren Trend stellt die Personalisierung und Individualisierung von Dienstleistungen, Produkte und Informationen dar [5]. Im Zeitalter der Digital Immigrants und Digital Natives [6] gehören Smartphones, Internet und datenbasierte Dienste zum Alltag. Daten sind ein wertvollen Investitionsgut geworden und ermöglichen maßgeschneiderte Services, die sich intuitiv in das Leben des Kunden integrieren. In der Automobilbranche begann die Produktpersonalisierung in den 1990er Jahren mit der Memory-Funktion für Sitz- und Spiegelpositionen. Das Fahrzeug „merkte“ sich die manuell vorgegeben Aktuatorstellungen, die der Fahrer zu einem beliebigen Zeitpunkt durch einen Tastendruck speziell in diesem Fahrzeug abrufen konnte. Aktuelle Systeme speichern fahrzeugbezogene Einstellungen automatisch auf dem Fahrzeugschlüssel und sind in der Lage über Telematik-Dienste mit dem Fahrer zu kommunizieren [7]. Basierend auf Telematik-Diensten wird in diesem Beitrag ein Konzept zur Individualisierung des energieeffizienten Fahrerlebnisses vorgestellt. Durch die Anwendung neuartiger Analysemethoden und lernender Ansätze soll eine Verbesserung der Kundenakzeptanz von verbrauchssparenden Fahrerassistenzsystemen erzielt werden.

2. Global energieoptimales Transportproblem

Die Überwindung einer Distanz zwischen zwei Orten mit einem Kraftfahrzeug lässt sich angelehnt an [8] in hierarchisch gegliederte Aufgaben unterteilen: Navigation, Führung und Stabilisierung. Bild 1 verdeutlicht das Transportproblem, das es vom Fahrer zu lösen gilt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

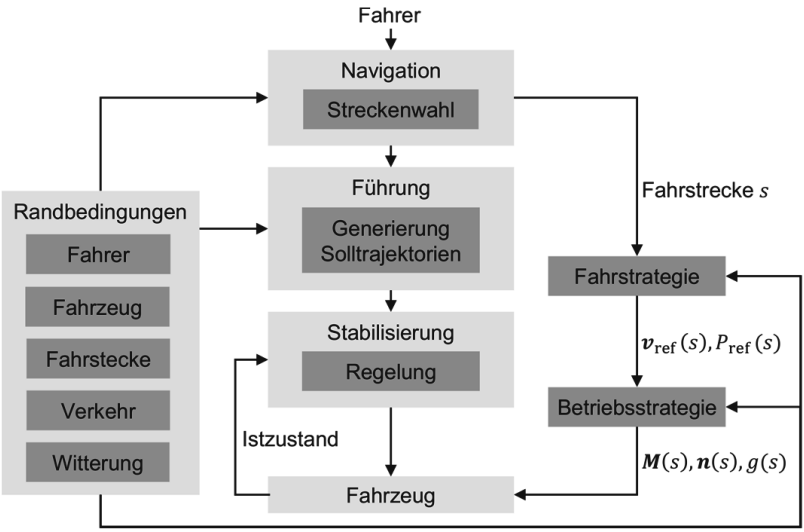


Bild 1: Systematische Betrachtung des global energieoptimalen Transportproblems

In Vorbereitung einer Fahrt wählt der Fahrer eine Strecke anhand objektiver (Streckenlänge, Verkehrsdichte) und subjektiver (persönliche Vorlieben) Kriterien aus. Die Führungs- und Stabilisierungsaufgabe bilden den Prozess des Fahrens ab. Die Führungsaufgabe fasst die prädiktive Planung der Spur- und Geschwindigkeitstrajektorie im Rahmen der Sichtweite des Fahrers zusammen. Die Stabilisierungsaufgabe beinhaltet die situationsbasierte Regelung des Fahrzeugs, mit dem Ziel das Fahrzeug mit der gewählten Geschwindigkeit auf der Spur zu führen. Der Energieverbrauch der Transportaufgabe bestimmt sich demnach aus der Streckenwahl, den aktuellen Umgebungsbedingungen sowie der Fahrweise des Fahrers. In zahlreichen Veröffentlichungen werden Methoden vorgestellt, um den Fahrer durch energiesparende FAS zu unterstützen [z. B. 9-11]. Zusammenfassend lassen sich dabei drei Tendenzen erkennen, die verfolgt werden:

- Unterstützung des Fahrers bei der Streckenwahl (Eco-Route)
- Optimierung der Solltrajektorien für eine gegebene Strecke mittels Vorausschau
- Direkte und indirekte Beeinflussung der Fahrweise (haptisches Fahrpedal, Schaltempfehlung)

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Schwerpunkte bilden in Kombination ein ganzheitliches Konzept zur Verbrauchsminderung. Der in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz basiert auf der Optimierung des Verbrauchs für eine gegebene Strecke durch Prädiktion der Solltrajektorien. Es wird jedoch auch gezeigt, dass sich die Funktionalität des Ansatzes durch die cloudbasierte Umsetzung zur Vorhersage verbrauchsgünstiger Strecken eignet.

2.1 Funktionsweise prädiktiver Fahrstrategien

Der Energieverbrauch eines Fahrzeugs F für eine gegebene Strecke s lässt sich vereinfacht berechnen aus

$$E_{\mathrm{Fahr}}(s) = \int_{t_0}^{t_{\mathrm{Ziel}}} P_{\mathrm{Fahr}}\,\mathrm{d}t = \int_{t_0}^{t_{\mathrm{Ziel}}} F_{\mathrm{W}}(F, s, \boldsymbol{v}, \dot{\boldsymbol{v}}) * \boldsymbol{v}\,\mathrm{d}t \qquad (1)$$

mit dem Fahrleistungsbedarf P_{Fahr}, den zusammengefassten Fahrwiderständen F_{W} und der Fahrzeuggeschwindigkeit $\boldsymbol{v}$ [12]. Unter der Annahme, dass Fahrzeug und Strecke nicht variiert werden können, stellt die Optimierung der Geschwindigkeit ein probates Mittel dar (siehe Gleichung 1), um den Energieverbrauch zu minimieren. Diese Aufgabe wird von der Fahrstrategie übernommen, deren Aufbau und Funktionsweise in Bild 2 dargestellt ist.

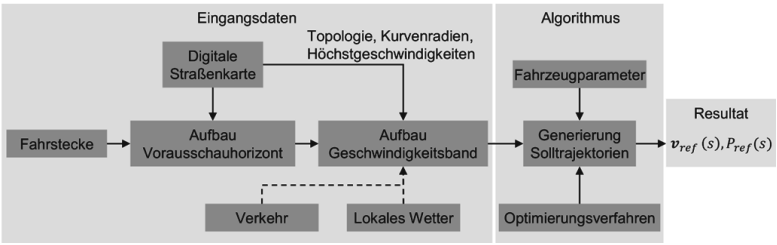


Bild 2: Modularer Aufbau einer optimierungsbasierten prädiktiven Fahrstrategie

Durch die Analyse der vorausliegenden Fahrstrecke unter Nutzung von Kartendaten wird ein Geschwindigkeitsband aufgespannt, in dem das nachgelagerte Optimierungsverfahren die Referenztrajektorien der Fahrzeuggeschwindigkeit $\boldsymbol{v}_{ref}(s)$ sowie des Fahrleistungsbedarfs $P_{ref}(s)$ generiert. Die Bildung des Geschwindigkeitsbands erfolgt meist iterativ in Abhängigkeit der zu berücksichtigenden Einflussgrößen [13]. Die obere Geschwindigkeitsbegrenzung ergibt sich aus

- den abschnittsweise gültigen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten,
- den maximal dem Fahrer zumutbaren Längs- und Querbeschleunigungen,
- wetterbedingten fahrdynamischen Einschränkungen (Niederschlag, Eis, Nebel),
- verkehrsbedingte Einschränkungen (Fahrzeugdichte, Verkehrsbehinderungen).

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die untere Grenze setzt sich dagegen aus frei wählbaren Minimalwerten zusammen, die eine im realen Verkehrsfluss verantwortbare Fahrzeugführung gewährleisten. Bei zu niedrigen Geschwindigkeiten besteht die Gefahr, dass das Fahrzeug zu einem Verkehrshindernis wird, wodurch u. a. Gefahrensituationen entstehen können. Die Generierung der Solltrajektorie erfolgt auf Basis multikriterieller Optimierung hinsichtlich Fahrtdauer, Fahrbarkeit und Energieverbrauch. Die Einbeziehung weiterer Kriterien sowie deren Wichtung hängen vom konkreten Anwendungsfall ab. In [14] werden beispielsweise Fahrstrategien entwickelt, um eine definierte Fahrstrecke (NEFZ) innerhalb der gleichen Zeitdauer energieeffizienter zurückzulegen, während hingegen in [15] bewusst eine längere Fahrdauer zur Verbrauchseinsparung akzeptiert wird. Zusätzlich zu den optimierungsbasierten Varianten der Fahrstrategien sind historienbasierte Ansätze denkbar, die auf eine bereits für die vorliegende Fahrstrecke verfügbare Datenbasis über den Energiebedarf in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit zurückgreifen. Aufgrund der bisherigen lokal begrenzten Technologien und limitierten Speicherfähigkeit in herkömmlichen Steuergeräten konnten solche Ansätze bisher nicht umgesetzt werden.

2.2 Umsetzung der Fahrstrategie

Die berechneten Referenztrajektorien $\boldsymbol{v}_{ref}(s)$, $P_{ref}(s)$ befähigen das System Fahrer-Fahrzeug die Fahrstrecke energieoptimal zurückzulegen. Mithilfe des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug-Fahrumgebung [16] ergeben sich hierfür zwei Umsetzungskonzepte (siehe Bild 3):

1. Bekanntmachung der Solltrajektorien an den Fahrer, Fahrer setzt $\boldsymbol{v}_{ref}(s), P_{ref}(s)$ um
2. Übergabe der Sollwerte an ein Längsregelungssystem (ACC), das die Umsetzung von $\boldsymbol{v}_{ref}(s)$, $P_{ref}(s)$ sicherstellt

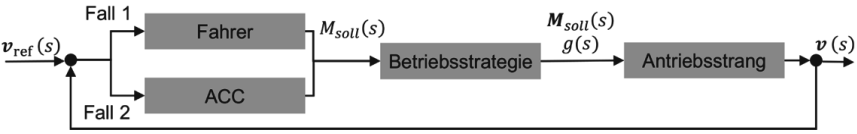


Bild 3: Vereinfachter Regelkreis Fahrer-Fahrzeug für die Umsetzung der Fahrstrategie

Der Fahrer bzw. die ACC-Funktion regeln jeweils die Fahrzeuggeschwindigkeit $\boldsymbol{v}(s)$. Durch die Betätigung des Fahrpedals bzw. durch das ACC wird ein Wunschmoment $M_{soll}(s)$ vorgegeben, das durch die unterlagerte Betriebsstrategie in die Stellgrößen des Antriebsstrangs $\boldsymbol{M}_{soll}(s), g(s)$ umgewandelt wird. Im ersten Fall muss $M_{soll}(s) \sim P_{ref}$ gelten, d. h. der Fahrer muss kontinuierlich und ohne zeitliche Verzögerung die Dosierung des Fahrpedals anpassen, damit $\boldsymbol{v}(s) = \boldsymbol{v}_{ref}(s)$ gilt. Ein aktives Fahrpedal mit einer einstellbaren Widerstandskraft

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

wäre in diesem Fall zwingend erforderlich, da der Fahrer die Sollgrößen ansonsten visuell oder akustisch übermittelt bekommen müsste, was auf Dauer zu einer zu starken Ablenkung vom Verkehrsgeschehen führt. Darüber hinaus würde die Rückkopplung der Momentenvorgabe fehlen, womit die Regelgüte sinkt und das Folgeverhalten negativ beeinträchtigt wird.
Im zweiten Fall setzt die Längsregelung die Geschwindigkeitsvorgabe der Fahrstrategie um. Für Erläuterungen zu einem derartigen verbrauchsoptimierenden Längsregler wird auf [12,13] verwiesen. Die direkte Ansteuerung des Antriebsstrangs übernimmt in beiden Fällen die Betriebsstrategie, deren Funktionen im folgenden Abschnitt kurz aufgegriffen werden.

2.3 Funktionen der Betriebsstrategie

Mit der Einführung elektrifizierter Antriebsarchitekturen entstand die Notwendigkeit den Energiefluss zwischen mehreren Antriebsaggregaten und der eingeführten Hochvoltbatterie zu koordinieren [17]. Die Hauptaufgaben der Betriebsstrategie sind hierbei die Optimierung des Batterieladegrads und die bedarfsgerechte Ansteuerung der Antriebskomponenten. Betriebsstrategien leisten einen entscheidenden Beitrag zur Verbrauchs- und Schadstoffreduktion und bilden seit über 15 Jahren einen Schwerpunkt in der automobilen Forschung. Analog zu den Fahrstrategien optimieren die Betriebsstrategien unter Berücksichtigung variabler Kriterien maßgeblich den Energieverbrauch des Fahrzeugs. Aufgrund der Vielfalt an Lösungsansätzen sei an dieser Stelle an einige beispielhafte Ausführungen über Betriebsstrategien mit und ohne Prädiktion verwiesen [18-20].
Die Ergebnisse in der bisherigen Forschung lassen zusammenfassend folgende Aussagen zu:

- Heutige Betriebsstrategien sind mit hinreichender Genauigkeit in der Lage den Fahrleistungsbedarf energieoptimal umzusetzen.
- Optimierungsbasierte Ansätze reizen das theoretische Verbrauchseinsparungspotenzial aus (sie werden gegenüber anderen Ansätzen als Referenzkriterium genutzt).
- In der Praxis kommen aufgrund von Echtzeit- und Kostenanforderungen regelbasierte Ansätze zum Einsatz.
- Vorausschauende Ansätze bieten gegenüber situativ entscheidenden Ansätzen einen Verbrauchsvorteil < 10% bei deutlich höherem Rechenaufwand.

Aufgrund des hohen Wirkungsgrads heutiger Betriebsstrategien und der vielfältigen sowie stetig wachsenden Forschungslandschaft wurde im Rahmen dieser Arbeit auf ein Engagement zugunsten der Fahrstrategien, die ein höheres Potenzial der Optimierung bieten, verzichtet.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Aufbauend auf den Erläuterungen zu Fahr- und Betriebsstrategien wird im folgenden Abschnitt der neuartige Ansatz zur Gestaltung intelligenter Fahrstrategien vorgestellt.

3. Individuelles energieoptimales Fahrerlebnis

Zunächst werden aktuelle Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten bekannter Ansätze diskutiert, bevor auf die Individualisierung der energieoptimalen Geschwindigkeit im realen Einsatz eingegangen wird.

3.1 Herausforderungen heutiger Ansätze

Aus Abschnitt 2.1 ist bekannt, dass Fahrstrategien das Ziel besitzen für eine gegebene Fahrstrecke s die unter definierten Randbedingungen (Fahrtdauer, Fahrbarkeit) gültige verbrauchsoptimale Geschwindigkeitstrajektorie $\boldsymbol{v}_{ref}(s)$ zu bestimmen. Die Kriterien Fahrbarkeit und Prädiktionsgüte gelten im Sinne der Kundenakzeptanz als Schlüsselfaktoren für die Akzeptanz der berechneten Geschwindigkeit, sollte diese z. B. von einem Längsregler übernommen werden. Empfindet einer der Insassen im Fahrzeug $\boldsymbol{v}_{ref}(s)$ als nicht angenehm, wird der Fahrer im Zweifelsfall den Längsregler überstimmen oder deaktivieren. In beiden Fällen kommt es zu einem energetisch suboptimalen Fahrzeugverhalten. Weiterhin kann die Funktionalität des gesamten FAS vom Kunden angezweifelt werden, was im schlimmsten Fall zu einer Reklamation und zu einem Imageverlust für den Fahrzeughersteller führen kann.

Forderung: Eine Fahrstrategie muss das individuelle Fahrverhalten berücksichtigen.

Die Prädiktionsgüte fasst die Qualität und Genauigkeit der berechneten Geschwindigkeitsprognose zusammen. Muss der Fahrer korrigierend eingreifen, weil die Position des Ortseingangsschilds aus veralteten Kartendaten stammt und das Fahrzeug mit $\boldsymbol{v}(s) > 50\ \mathrm{km/h}$ segelnd eine Ortsgrenze überfährt, gilt dies als unakzeptables Systemverhalten. Es besteht daher die Notwendigkeit einer stets aktuellen Datenbasis für die Berechnung der Fahrstrategie.

Forderung: Eine Fahrstrategie erfordert eine stets aktuelle Datenbasis.

Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wurde in [12] eine Streckendatenbank für die Prädiktion des Streckenverlaufs für einen speziellen Rundkurs fest im Versuchsfahrzeug hinterlegt und manuell mit weiteren Attributen angereichert, die nicht in der digitalen Karte enthalten waren. Dieses Vorgehen genügt einer prototypischen Umsetzung auf einer Teststrecke, ist jedoch nicht praxistauglich. Die Fahrstrategie muss daher ein generisches Konzept aufweisen, um sie allgemein für jede Fahrstrecke nutzen zu können.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Forderung: Das Konzept einer Fahrstrategie soll universell für jeden Streckenverlauf anwendbar sein.

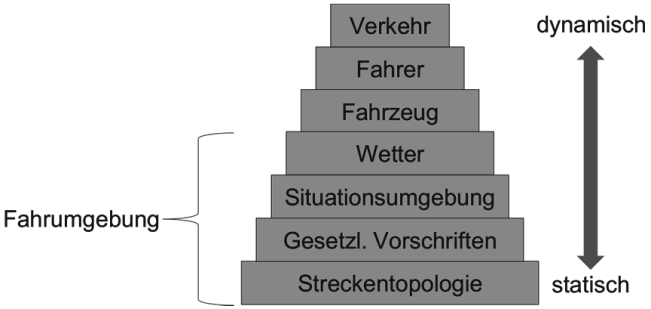


Bild 4: Schichtmodell der Einflussfaktoren auf die individuelle Fahrzeuggeschwindigkeit

Bild 4 zeigt die Einflussfaktoren auf die Fahrzeuggeschwindigkeit aus Fahrersicht, die teilweise in [12, 13, 21] berücksichtigt und ebenso in [16] diskutiert werden. Das Schichtmodell verdeutlicht die Überlagerung und die erwartete Dynamik der Einflussfaktoren.

Forderung: Eine maximale Prädiktionsgüte erfordert die Berücksichtigung sämtlicher statischer sowie dynamischer Einflussfaktoren.

3.2 Konzept zur Individualisierung des energieeffizienten Fahrerlebnisses

Ausgehend von den vier ermittelten zentralen Anforderungen an eine Fahrstrategie wird in diesem Abschnitt ein Konzept vorgestellt, das auf Basis des subjektiven Fahrerverhaltens eine Geschwindigkeitstrajektorie erstellt und diese energieoptimal umsetzt.

Berücksichtigung des individuellen Fahrerverhaltens

Die fahrsituationsbezogene Fahrzeuggeschwindigkeit $\boldsymbol{v}_{sit}(s)$ lässt sich abstrahieren zu

$$\boldsymbol{v}_{sit}(s) = f(Fahrer, Fahrzeug, Fahrumgebung) \tag{2}$$

Sind die einzelnen Variablen und deren Abhängigkeiten untereinander bekannt, kann $\boldsymbol{v}_{sit}(s)$ für die Fahrstrecke s prädiziert werden. Hierfür wird eine Versuchsflotte mit Telematik-Einheiten ausgerüstet, die konfigurierbare Informationsumfänge kontinuierlich an ein Backend-System sendet. Anhand der empfangenen Daten können beliebige Fahrsituationen rekonstruiert werden. Die Zerlegung des komplexen Systems Fahrer-Fahrzeug-Fahrumgebung in seine Bestandteile basiert dabei auf der 3F-Methode [22]. Um die Praxistauglichkeit zu gewährleisten, wird die Annahme getroffen, dass die Fahreridentifikation aus Datenschutzgründen nicht möglich ist. Daher wird nicht die Komponente Fahrer sondern

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

seine Wirkung die Fahrweise betrachtet. Dieser als Black-Box-Modell bekannte Ansatz dient der Beschreibung eines komplexen Systems allein durch Ursache und Wirkung, ohne die inneren Zustände zu kennen.

Es gilt

$$v_{sit}(s) = f(Fahrweise(Fahrer), Fahrzeug, Fahrumgebung) \quad (3)$$

Die Fahrweise ermöglicht die Gruppierung mehrerer Fahrer, die ähnliche Verhaltensweisen aufweisen. Weiterhin berücksichtigt dieser Ansatz, dass sich die Fahrweise eines Fahrers abhängig vom Fahrzeug, der Tageszeit oder des Wetters ändern kann.

Absicherung einer aktuellen Datenbasis

Die exakte Abbildung der Fahrumgebung auf der Basis digitaler Karten, Datenbanken und Einbeziehung externer Informationsquellen sichert die Prädiktionsgüte der Fahrstrategie. Für diesen Zweck werden die Flottendaten, dynamische Wetter- und Verkehrsdaten sowie statische Karteninformationen zu einer gemeinsamen Datenbasis fusioniert. Ein automatisierter Prozess sichert die Integration neuer Daten in die bestehende Datenbasis ab.

Universelle Verwendbarkeit und Berücksichtigung sämtlicher Einflussfaktoren

Reine historienbasierte Ansätze haben den Nachteil, dass die Prädiktion auf bereits gefahrene Streckenverläufe beschränkt ist. Eine getrennte Analyse und Bewertung der Einflussfaktoren auf die Fahrzeuggeschwindigkeit ermöglicht eine Vorhersage für Strecken, für die noch keine Flottendaten vorhanden sind. Für unbekannte Strecken werden regelbasierte Vorhersagen auf Basis der vorhandenen Daten getroffen, während für bekannte Strecken eine Kombination aus historien- sowie regelbasiertem Ansatz angewendet wird. Hierzu ist die Datenbasis als lernendes System konzipiert, d.h. das reale Fahrverhalten der Fahrzeugflotte wird durch noch zu definierende Algorithmen situationsbasiert nach Mustern hin untersucht und Ergebnisse direkt in die Datenbasis zurückgespeist.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

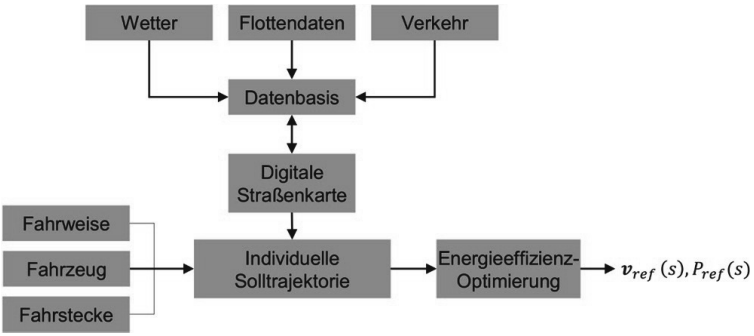


Bild 5: Aufbau einer Fahrstrategie für die Generierung personalisierter Solltrajektorien

Das resultierende Konzept ist in Bild 5 dargestellt. Die individuelle Solltrajektorie bildet die Grundlage für die anschließende energetische Optimierung. Die automatisierte Ermittlung der Fahrweise ist noch gegenwärtiges Forschungsthema. Der aktuelle Fortschritt bei der Umsetzung der Fahrstrategie wird im folgenden Abschnitt kurz erläutert.

3.3 Cloudbasierte Umsetzung

Sowohl die Datenbasis als auch die Algorithmen sind auf eine hohe Datenverfügbarkeit und Rechenleistung angewiesen, die mit serienmäßigen Steuergeräten im Fahrzeug nicht darstellbar sind. Eine Auslagerung der Fahrstrategie auf externe Rechensysteme im Fahrzeug wie in [12, 13] wird aufgrund der Einbindung von Flottendaten als nicht zweckmäßig bewertet. Daher wird das Konzept auf einem Backend-System innerhalb einer Cloud-Umgebung implementiert.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

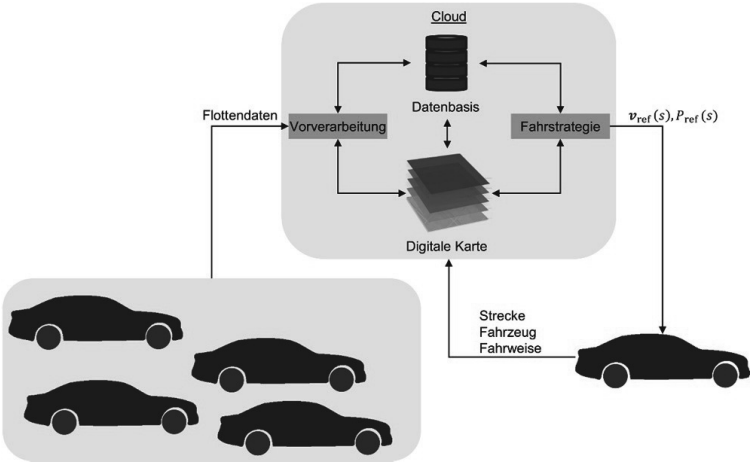


Bild 6: Cloudbasierte Umsetzung der Fahrstrategie

Die Flottendaten durchlaufen mehrere Schritte der Vorverarbeitung, bevor die extrahierten Informationen in Form von geobasierten Streckenattributen in einer Datenbank gespeichert werden. Die Streckenattribute sind über eindeutige Schlüssel mit der Karte verbunden. Mit diesem Verfahren ist u. a. die Erfassung realer Energieverbräuche möglich, die zur Verbesserung der Vorhersage von energiesparenden Fahrstrecken beitragen. Die Trennung der Datenbasis von der Karte sichert den Datenschutz der Flottendaten ab und erlaubt die Verwendung externer Kartenanbieter. Für weitere Information zur Cloud-Umgebung wird auf [23] verwiesen. Die Implementierung der Fahrstrategie sowie die Entwicklung der notwendigen Algorithmen stehen zurzeit im Fokus des Projekts.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Fahrgeschwindigkeit hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Energieverbrauch eines Fahrzeugs. Sie wird durch den Fahrer mithilfe von Fahrstrategien optimiert, die zudem ein verbrauchsminimales Fahren ermöglichen. Die Umsetzung der Leistungsanforderung im Antriebsstrang wird anschließend von einer Betriebsstrategie koordiniert und hat bereits einen sehr hohen Wirkungsgrad erreicht. Unter dem Aspekt der Kundenakzeptanz wird daher ein Konzept für eine Fahrstrategie vorgestellt, das die reale Fahrweise des Kunden berücksichtigt und in die Planung einer individuellen energieeffizienten Geschwindigkeitstrajektorie einbezieht. Das gesamte Konzept ist als selbstlernendes System ausgelegt, wodurch die Prä-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

diktionsgüte mit steigender Nutzerrate stetig zunimmt. Die Implementierung der Fahrstrategie erfolgt zentral in einer Cloud-Umgebung.

Die aktuellen Herausforderungen liegen im Aufbau der Datenbasis, der Anbindung dynamischer Informationsquellen sowie in der Implementierung der Algorithmen auf dem Backend. Weiterhin sind die Vergrößerung der Versuchsflotte geplant sowie weitere Untersuchungen zur automatisierten Erkennung der Fahrweise.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Quellen

[1] Mobilität im Alltag, Dossier, Statista, 2016

[2] Energiemanagement und Bedienkonzept: Intelligente Betriebsstrategie, Daimler AG, 2014, http://media.daimler.com/marsMediaSite/ko/de/9904554, Abruf: 11.05.2017

[3] Energiemanagement – Fahrfreude durch Intelligenz, BWM AG 2015, http://www.bmw.de/de/topics/faszination-bmw/efficientdynamics-2015/energiemanagement.html, Abruf: 11.05.2017

[4] Porsche InnoDrive, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG 2017, http://www.porsche.com/germany/models/panamera/panamera/assistance-systems/porsche-innodrive/, Abruf: 11.05.2017

[5] Digital Transformation of the Automotive Industry, Frost & Sullivan, 2017

[6] Prensky, M.: Digital Natives, Digital Immigrants. On The Horizon 9 (2001) 5, S. 1-6

[7] BMW ConnectedDrive, BMW AG 2017, https://www.bmw.de/de/topics/faszination-bmw/connecteddrive/ubersicht.html, Abruf 12.05.17

[]8 Donges, E.: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. Automobil-Industrie 27 (1982) 2, S: 183–190

[9] Dorrer, C.: Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung telematischer Informationen. Renningen: expert-Verlag 2004

[10] Heppeler, G. u. a.: Predictive planning of optimal velocity and state of charge trajectories for hybrid electric vehicles. Control Engineering Practice 61 (2017), S. 229-243

[11] Back, M.: Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen., Universität Karlsruhe Diss. 2006

[12] Radke, T.: Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien., Karlsruher Institut für Technologie Diss. 2013

[13] Freuer, A.: Ein Assistenzsystem für die energetisch optimierte Längsführung eines Elektrofahrzeugs. Universität Stuttgart Diss. 2015

[14] Mensing, F., Trigui, R., Bideaux, E.: Vehicle trajectory optimization for application in ECO-driving. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011, S. 1-6

[15] Glaser, S. u. a.: Smart and Green ACC, adaptation of the ACC strategy for electric vehicle with regenerative capacity. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013, S. 970-975

[16] Winner, H. u. a.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[17] Guzzella, L., Sciarretta, A.: Vehicle propulsion systems. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2005

[18] Kutter, S.: Eine prädiktive und optimierungsbasierte Betriebsstrategie für autarke und extern nachladbare Hybridfahrzeuge. Technische Universität Dresden Diss. 2013

[19] von Grundherr, J.: Ableitung einer heuristischen Betriebsstrategie für ein Hybridfahrzeug aus einer Online-Optimierung. Technische Universität München Diss. 2010

[20] Petit, N., Sciarretta, A.: Optimal drive of electric vehicles using an inversion-based trajectory generation approach, IFAC Proceedings Volumes 44 (2011) 1, S. 14519-14526

[21] Sauer, A., Perschl, A., Rottengruber, H.: Vorausschauende Betriebsstrategie von Hybridfahrzeugen mit Backend-Anbindung. at – Automatisierungstechnik 64 (2016) 5 S. 385-395

[22] Küçükay, F., Kassel, T.: Anforderungsoptimierung für Getriebe und Komponenten. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 109 (2007) 9 S.812-819

[23] Gothan, T., Großmann, R., Bäker, B.: Entwicklung eines Frameworks für neue Fahrerassistenzfunktionen in der Cloud am Beispiel der Fahrerklassifizierung. Diese Ausgabe

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Elektrochemische Charakterisierung und physikalische Modellierung von Lithium-Ionen Batterien

Electrochemical characterization and physically based modeling of lithium-ion batteries

Sophia Gantenbein M.Sc., Dipl.-Ing. **Michael Weiss**,
Prof. Dr.-Ing. **Ellen Ivers-Tiffée**, Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffe der Elektrotechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Batteriemodels, welches die Arbeitsspannung U_{op} einer Lithium-Ionen Hochleistungsbatterie bei variierenden Betriebsbedingungen simuliert. U_{op} ergibt sich aus der Leerlaufspannung U_{OCV} und der Summe der Überspannungen η_i welche unter Last anfallen.

$$U_{op} = U_{OCV}(T, SOC) + \eta_0(T, SOC, I) + \eta_{CT,C}(T, SOC, I) + \eta_{CT/SEI,A}(T, SOC, I) + \eta_{Diff,A/C}(T, SOC, I)$$

Die Leerlaufspannung U_{OCV} wird mit einer quasistationären Methode bestimmt. Die ohmschen Verluste η_0 sowie die Grenzflächenverluste $\eta_{CT,C}$ und $\eta_{CT/SEI,A}$ werden durch die Anwendung von elektrochemischer Impedanzspektroskopie im hoch- und mittelfrequenten Bereich gemessen und können mittels einer darauffolgenden DRT-Analyse voneinander getrennt betrachtet werden. Mit Hilfe eines Ersatzschaltbildmodels (ESB) können diese Verlustprozesse quantifiziert und ihre Widerstände und Zeitkonstanten, welche zur Berechnung der Überspannung benötigt werden, ermittelt werden. Die Verluste durch die Festkörperdiffusion von Lithium $\eta_{Diff,A/C}$ werden mit einer Strompulsmethode im Zeitbereich untersucht welche sich für die Analyse des niederfrequenten Bereichs anbietet und welche ebenso den Widerstand und die Zeitkonstante des Prozesses liefert. Schließlich wird eine kontinuierliche Entladekurve simuliert. Das ESB kann auch als Basis für physikalisch motivierte fraktionale Identifikationsmethoden dienen, welche Impedanzparameter aus Zeitbereichsdaten schätzen. Diese Methoden können im Umkehrschluss für die Online-Parametrierung des vorgestellten Batteriemodells verwendet werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Abstract

This work aims at the development of a battery model, which simulates the operating voltage U_{op} of a high power lithium-ion battery at varying operating conditions. U_{op} results from the open circuit voltage U_{OCV} and the sum of overvoltages η_i that exist when the battery is under load:

$$U_{op} = U_{OCV}(T, SOC) + \eta_0(T, SOC, I) + \eta_{CT,C}(T, SOC, I) + \eta_{CT/SEI,A}(T, SOC, I) + \eta_{Diff,A/C}(T, SOC, I)$$

The open circuit voltage U_{OCV} is determined with a quasi-stationary method. The ohmic loss η_0 and the interface losses $\eta_{CT,C}$ and $\eta_{CT/SEI,A}$ are measured and separated by the application of electrochemical impedance spectroscopy measurements in the high and middle frequency range and a corresponding DRT-analysis. Using an equivalent circuit model (ECM) enables the quantification of those loss processes and provides their resistance and time constant which are required to calculate the overvoltage. The lithium solid state diffusion losses $\eta_{Diff,A/C}$ are studied by a current interruption method in the time domain which is the method of choice in the low frequency range and which equally provides the resistance and the time constant of the process. Finally, a continuous discharge curve is simulated. The ECM also serves as a basis for physically motivated fractional identification methods which estimate the impedance parameters out of time domain data. These methods, in turn, can be used for online parametrization of the presented battery model.

1. Introduction

Models which simulate the voltage of a battery differ according to their complexity. Electrochemical models [1], mathematical models [2] or behavioral models [3] are of varying quality with respect to accuracy, computation time, real-time capability and physical interpretability, as the field of application varies. In [3-9] models are established which can estimate the voltage of lithium-ion batteries based on simple equivalent circuit models (ECM). The ECM only consists of a voltage source, a resistor and RC elements or RQ elements which are then approximated by an appropriate number of RC elements to enable a transformation to the time domain. Thanks to the low complexity of these models, the parameters can be estimated online, with an estimation algorithm, from operating signals. This approach is implemented in behavioral models which are nowadays applied in electric vehicles. Although state of the art battery models are able to estimate the battery voltage very precisely, they do not allow interpretation about the causes of power losses and the limiting processes in a battery.

The focus of this work is the estimation of the battery voltage based on a complex physical model which (i) describes separately all linear and nonlinear loss contributions in a battery

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

and which (ii) allows interpretation of all model parameters. For this purpose, high-resolution electrochemical characterization in the time and in the frequency domain of the battery is indispensable.

Model description

The operating voltage (U_{op}) of a battery results from the open circuit voltage (U_{OCV}) and the sum of overvoltages η_i that exist when the battery is under load and which diminish the usable capacity. The operating voltage is calculated using equation (1.1), where the total overvoltage η_i is added to the U_{OCV} during charging and subtracted when the battery is discharged.

$$U_{op} = U_{OCV} \pm \sum_i \eta_i \tag{1.1}$$

The total overvoltage η_i is caused by linear (ohmic) and nonlinear loss contributions which are listed below and shown in Fig. **1** a) [10,11]:

1. Ohmic loss (η_0) caused by the ionic conductivity of the electrolyte as well as the electronic conductivity of active electrode material and carbon black phase, and the electronic conductivity of the metallic current collectors.
2. Interface loss ($\eta_{CT,A/C}$, $\eta_{SEI,A}$) arising from the charge transfer resistance at the interface between positive electrode (cathode) or negative electrode (anode) and electrolyte, when lithium ions are intercalated into the active electrode material or vice versa, including the contributions of the solid electrolyte interface (SEI) at the anode.
3. Diffusion loss ($\eta_{Diff,A/C}$) arising from the lithium solid state diffusion in the active electrode materials during charging or discharging, when lithium ions are transported from the surface to the center of the particles and vice versa.
4. Contact loss ($\eta_{CC,A/C}$) originating from the charge transfer of electrons at the interface between cathode or anode and current collector and from particle/particle contacts.

Fig. **1** b) represents the course of the battery voltage when a discharge current is applied. At $t<t_1$ the battery voltage is in equilibrium (U_{OCV}). At t_1 an instantaneous voltage change originates from the sum of ohmic loss contributions η_0. Between t_2 and t_3 a voltage change is caused by processes with a small time constant like contact processes ($\eta_{CC,A/C}$), charge transfer processes ($\eta_{CT,A/C}$) or the SEI process ($\eta_{SEI,A}$). At larger time constants, i.e. between t_3 and t_4, a lithium concentration gradient is built up in the active electrode materials which induces a diffusion overvoltage ($\eta_{Diff,A/C}$).

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

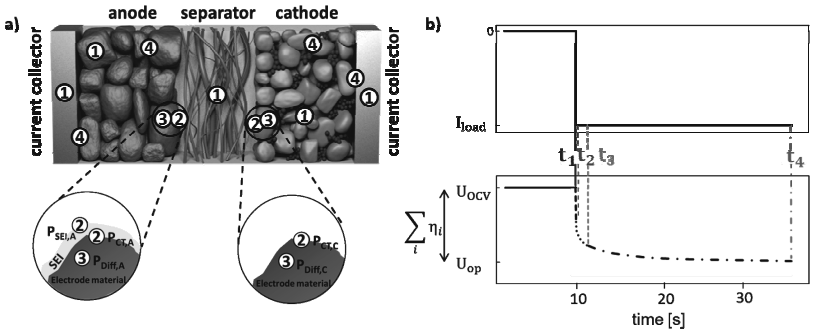


Fig. 1: a) loss processes in a lithium-ion battery, adapted from [1], b) course of the overvoltage of a battery when a current is applied

Considering the linear and nonlinear contributions to the total overvoltage η_i, equation (1.1) can be written as

$$U_{op} = U_{OCV} + \eta_0 + \eta_{CC,A/C} + \eta_{CT,A/C} + \eta_{SEI,A} + \eta_{Diff,A/C} \tag{1.2}$$

The differing time constants of the individual loss contributions require different measurement techniques. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) ideally separates loss contributions with small and medium time constants which evolve at frequencies ranging from MHz to some mHz [12,13]. At large time constants, i.e. in the low frequency range between mHz and µHz, the lithium solid state diffusion in the cathode and anode and the capacitive behavior of the battery becomes relevant. In this frequency range, time domain measurements (TDM) or pulse measurements are the method of choice. Detailed analyses of lithium-ion cells by means of EIS can be found in [14,15]. Analyses using TDMs are described in [16-18].

2. Electrochemical characterization

2.1 Investigated Cell

In this work, a lithium-ion high-power pouch cell with a nominal capacity of 350 mAh (Kokam SLPB 283452H) is investigated. Upper and lower voltage limits are 4.2 V and 2.7 V, maximum charge and discharge currents are 700 mA and 7 A. The anode consists of graphite and the cathode is made of a blend of $LiNiCoAlO_2$ and $LiCoO_2$. For further analysis, the electrodes have been harvested from the pouch cell and measured in a three-electrode setup, thoroughly described in [19,20].

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2.2 Analytical Equipment

For all measurements, the 1470E Cell Test System from Solartron Analytical Ltd UK has been used. Impedance measurements have been done with a 1455 Frequency Response Analyzer in combination with the 1470E System. The pouch cells were placed in climate chambers type VT 4200 from Vötsch Industrietechnik GmbH.

2.3 Experimental and Modeling

The OCV, EIS and TDM measurements have been carried out at different SOCs and temperatures.

2.3.1 Open Circuit Voltage

The U_{OCV} has been determined by a quasi-stationary method. Starting at a SOC of 100%, the cell was discharged with a C-rate of C/40 until the lower voltage limit of 2.7 V (SOC of 0%). Subsequently, the cell was charged with the same C-rate until the upper voltage limit of 4.2 V (SOC of 100%). Finally, the U_{OCV} was calculated by linear interpolation (straight black line in Fig. **2**) of the charge and discharge voltage at each SOC. The low current rate keeps the effect of overvoltage small and by calculating the average of charge and discharge voltage, the hysteresis effect is minimized. This procedure has been repeated at 0 °C, 10 °C, 20 °C, 25 °C and 30 °C.

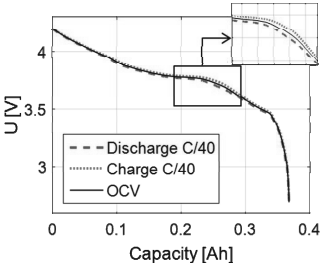


Fig. 2: Open circuit voltage of the investigated Kokam pouch cell derived from a quasi-stationary method at 25 °C

2.3.2 Analysis of high- and middle-frequent electrochemical processes

2.3.2.1 Electrochemical impedance spectroscopy

The impedance of a battery is measured by applying a sinusoidal potentiostatic or galvanostatic excitation signal and measuring the system response (Fig. **3** a)) [12,13]. The complex impedance can then be calculated by dividing the voltage by the current:

$$\underline{Z}(\omega) = \frac{\underline{u}(t)}{\underline{i}(t)} = \frac{u_0}{i_0} \cdot e^{j\cdot\varphi} = \mathrm{Re}(\underline{Z}) + j \cdot \mathrm{Im}(\underline{Z}) = Z' + j \cdot Z'' \qquad (1.3)$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

The measurements have been carried out in a frequency range from 10 kHz to 5 mHz with an AC amplitude of 10 mV for frequencies ≥ 100 mHz and an amplitude of 5 mV for frequencies < 100 mHz, at 0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100% SOC and at 0 °C, 10 °C, 20 °C, 25 °C and 30 °C. All measured data were checked with the Kramers-Kronig validity test which is based on the relation between the real and the imaginary part of the spectrum [21,22]:

$$\mathrm{Re}(\underline{Z}(\omega)) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \frac{\omega' \cdot \mathrm{Im}(\underline{Z}(\omega'))}{\omega^2 - \omega'^2} d\omega' \tag{1.4}$$

$$\mathrm{Im}(\underline{Z}(\omega)) = -\frac{2}{\pi}\int_0^\infty \frac{\omega' \cdot \mathrm{Re}(\underline{Z}(\omega'))}{\omega^2 - \omega'^2} d\omega' \tag{1.5}$$

By applying equation (1.4) or (1.5) to the real or to the imaginary part of the measured spectrum, the remaining part can be computed. The comparison of the calculated part and the measured part reveals the error. The smaller the Kramers-Kronig residuals are, the better is the data quality.[1]

Fig. **3** b) shows the impedance of the investigated lithium-ion pouch cell in a Nyquist diagram, with the real part plotted on the horizontal and the imaginary part plotted on the vertical axis. The inductive behavior at high frequencies results from the cell itself, the measurement setup and the cabling. The ohmic resistance (R_0) corresponds approx. to the intersection with the x-axis. The high frequent contact processes ($P_{CC,A/C}$) are hidden by the inductance which superimposes the contact losses taking place at the same frequency [10]. The interface processes ($P_{CT,A/C}$, $P_{SEI,A}$) taking place in the high and middle frequency range (approx. 10 kHz – 1 Hz) are expressed as semi-circles whereas the low frequent capacitive branch (approx. 1 Hz – 5 mHz) represents the beginning of the lithium solid state diffusion ($P_{Diff,A/C}$) in the electrodes and the capacitive behavior of the battery.

2.3.2.2 Distribution of relaxation times

Loss contributions with rather small and similar time constants like contact processes ($P_{CC,A/C}$), charge transfer processes ($P_{CT,A/C}$) or the SEI process ($P_{SEI,A}$) tend to overlap in a Nyquist plot. The calculation of the distribution of relaxation times (DRT) allows a better separation as described in [23]. The DRT is based on the idea that an impedance can be represented by an infinite number of RC elements. An ideal process has one discrete time constant and the impedance can be described with one RC element:

$$\underline{Z}(\omega) = \frac{R}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C} = \frac{R}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau} \tag{1.6}$$

[1] Impedance spectra can be easily checked with the “Lin-KK Tool” developed at IAM-WET, Download: https://www.iam.kit.edu/wet/english/Lin-KK.php

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In this case, the DRT equals a Dirac impulse with intensity R. This is shown in Fig. **3** c) (top) for two ideal processes. A real loss process consists of a distribution of relaxation times and can only be described with a sum of RC elements:

$$\underline{Z}(\omega) = \sum_{k=1}^{N} \frac{R_k}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau_k} \tag{1.7}$$

Assuming that this sum exists in the interval [0,∞], equation (1.7) can be written as:

$$\underline{Z}(\omega) = R_{Pol} \cdot \int_0^{\infty} \frac{g(\tau)}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau} d\tau \tag{1.8}$$

This equation links the distribution function $g(\tau)$ with the frequency dependent part of the impedance $\underline{Z}(\omega)$. $g(\tau)$ can then be plotted over the frequency f or over the time constants τ like shown in Fig. **3** c) (bottom).

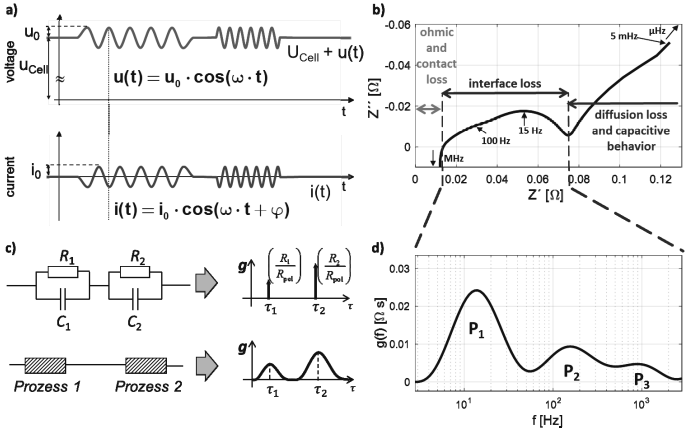


Fig. 3: a) excitation and response signals for EIS, b) Nyquist plot at T = 25 °C and SOC = 60% and characteristic areas of loss processes for the investigated Kokam pouch cell, c) two ideal (top) and two real (bottom) processes and their respective DRT, d) DRT calculated from the impedance in b)

Fig. **3** d) shows the DRT in the frequency range from 2 kHz to 1 Hz as calculated from the impedance plotted in Fig. **3** b).

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2.3.2.3 Experimental cell measurements

P_1, P_2 and P_3 were assigned to individual loss processes like charge transfer process ($P_{CT,A/C}$) or SEI process ($P_{SEI,A}$) by measurements of harvested electrodes in a three-electrode setup as shown in Fig. **4** a) and described in [19,20].

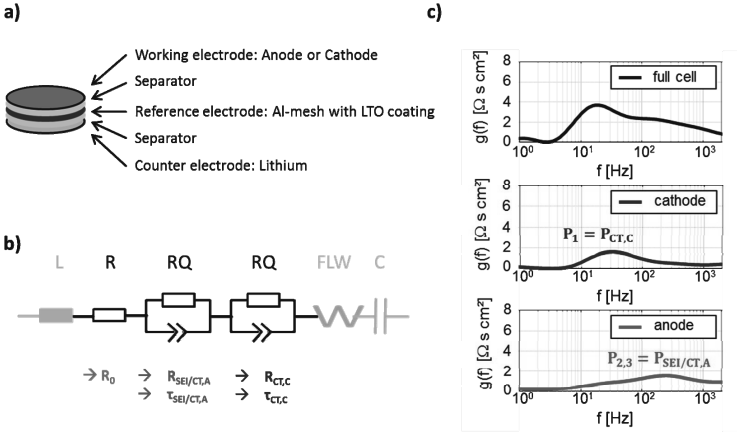


Fig. 4: a) three-electrode setup, b) equivalent circuit model of the investigated Kokam pouch cell, c) DRT of the full cell (pouch cell), the cathode and the anode at T = 25 °C, SOC = 40%, normalized to the active area

Fig. **4** c) shows the DRT of the pouch cell (black) as well as the DRTs of the cathode (blue) vs. reference and the anode (red) vs. reference, normalized to the active area of the respective cell setup. As evident from repeated measurements, the peak P_1 correlates to the charge transfer $P_{CT,C}$ taking place at the interface cathode/electrolyte, whereas peaks $P_{2,3}$ correlate with the closely neighbored charge transfer ($P_{CT,A}$) *and* the SEI ($P_{SEI,A}$) process with a major contribution. In [24] the authors showed, that $P_{CT,A}$ and $P_{SEI,A}$ can be analyzed separately only under specific conditions (SOC and temperature) . The porous structure of a technical graphite anode is reflected by a main peak (P_2) and a side peak (P_3). This characteristic is best matched by a transmission line model behavior, which is explained in detail in [24], but can be modelled by a RQ element, as well.

2.3.2.4 Equivalent circuit modeling

The proposed equivalent circuit model in Fig. **4** b) is composed of (i) a Finite Length Warburg element FLW with a serial capacity C, representing the lithium solid state diffusion and the differential capacity of the cell, (ii) two RQ elements representing the contributions of $P_{CT,C}$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

and $P_{CT/SEI,A}$, (iii) a serial resistance R_0, summarizing the ohmic contributions, and (iv) an inductor L, representing cable and cell inductivity. A similar ECM has been derived for lithium-ion batteries in [25].

2.3.3 Analysis of low-frequent electrochemical processes

When applying a current pulse to the battery, all loss contributions are stimulated and the total overvoltage η_i is built up. After switching off the current, the overvoltage contributions decay and the voltage relaxes to U_{OCV}. The overvoltage contributions (ohmic and contact loss η_0, charge transfer $\eta_{CT,C}$ and SEI $\eta_{CT/SEI,A}$) are subtracted first from the relaxing overvoltage and the diffusion overvoltage $\eta_{Diff,A/C}$ remains (see Fig. **5** a)). The course of $\eta_{Diff,A/C}$ greatly resembles with the course of a charge transfer process, but at a larger time constant. Descriptions similar to a RC element can be found in literature, in this work, equation (1.9) is derived based on [26].

$$\eta_{Diff,A/C} = I \cdot R_{Diff,1} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{t}}{\tau_{Diff,1}}\right)\right] + I \cdot R_{Diff,2} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{t}}{\tau_{Diff,2}}\right)\right] \tag{1.9}$$

$R_{Diff,1/2}$ are the diffusion resistances, $\tau_{Diff,1/2}$ are the diffusion time constants, I is the current and t is the time. In contrast to a RC element, the voltage depends on the square root of time and when fitting $\eta_{Diff,A/C}$, the time constant τ will be much larger than the one of a charge transfer process. The fit and the residuals are shown in Fig. **5** b).

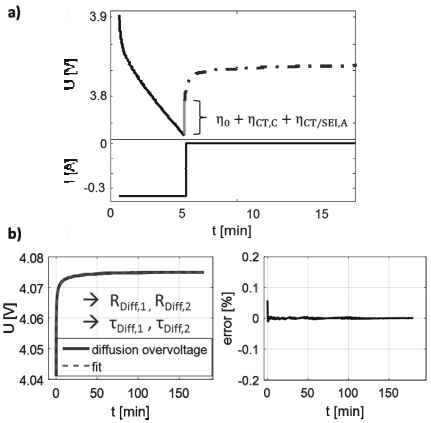


Fig. 5: a) TDM approach, b) time domain model fit and related residuals

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

The measurements have been carried out at SOCs between 5% and 90% in 5%-steps and at 20 °C, 25 °C and 30 °C. Measurements at lower temperatures were let aside, because of increasing self-heating effects of the cell (non-stationarity).

3. Simulation and Validation

The actual SOC of the battery at every time during simulation is required to choose the correct parameters. For this reason the amount of charge at every time needs to be calculated from the desired current profile by integration of the current over time:

$$\Delta C(k) = (t(k) - t(k-1)) \cdot \mathrm{I(k)} \tag{1.10}$$

ΔC is the amount of charge that flows between t(k) and t(k-1), t is the time vector and I the current vector. Knowing the nominal capacity and the SOC at the beginning of the simulation, the SOC of the battery can be calculated at all time during simulation. In addition, the temperature at which the battery is operated needs to be known due to the temperature dependency of the process parameters.

The operating voltage can then be calculated with equation (1.11):

$$U_{op} = U_{OCV}(T, SOC) + \eta_0(T, SOC, I) + \eta_{CT,C}(T, SOC, I) + \eta_{CT/SEI,A}(T, SOC, I) + \eta_{Diff,A/C}(T, SOC, I) \tag{1.11}$$

U_{OCV} is known from linear interpolation. The analysis of the fast loss processes has taken place in the frequency domain and needs to be transformed to the time domain. The ohmic overvoltage η_0 is calculated as:

$$\eta_0 = R_0 \cdot I \tag{1.12}$$

The resistance contributions $R_{CT/SEI,A/CT,C}$ and the corresponding time constant $\tau_{CT/SEI,A/CT,C}$ were derived by a CNLS fit of RQ elements, but for simplification the overvoltage $\eta_{CT/SEI,A/CT,C}$ is calculated by Laplace transformation of an RC element,

$$\eta_{CT/SEI,A/CT,C} = R_{CT/SEI,A/CT,C} \cdot I \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_{CT/SEI,A/CT,C}}\right)\right) \tag{1.13}$$

where I is the current and t is the time.

In Fig. **6** a), the simulation and validation of a continuous discharge curve at 1C and 25 °C is shown. The principal characteristics can be modelled with adequate precision, apart from SOC ranges where the electrodes show nonlinear behavior. The residuals in Fig. **6** b) are larger for SOCs smaller than 30%. This is likely caused by staging effects within the graphite anode particles. In this work, the lithium solid diffusion overvoltage $\eta_{Diff,A/C}$ was analyzed

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

without load during relaxation, but it might differ in case of a current applied which is the case when nonlinear behavior is dominant.

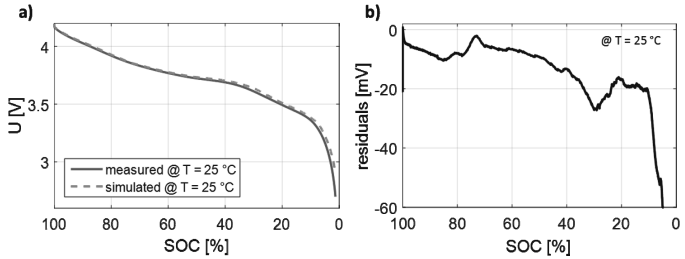


Fig. 6: a) simulation and validation of a continuous discharge curve at 1C and 25 °C, b) related residuals

4. Conclusion and Discussion

An equivalent circuit model was presented, which considers the SOC dependent individual loss contributions. Electrochemical impedance spectroscopy and time domain measurements have been carried out to cover the full frequency range and to ensure physical interpretability of all parameters.

At this stage of development, a simulation at varying current fails, as the Butler-Volmer behavior and the nonlinearity of the lithium solid state diffusion overvoltage is not included.

Literatur:

[1] Ender, J.: Mikrostruktuelle Charakterisierung, Modellentwicklung und Simulation poröser Elektroden für Lithiumionenzellen. Dissertation. Karlsruhe Institute of Technology, Institute for Applied Materials - Materials for Electrical and Electronic Engineering (2014)

[2] Cugnet, M., Dubarry, M., Liaw, B.Y.: Peukert's Law of a Lead-Acid Battery Simulated by a Mathematical Model. ECS Transactions 25 (35) (2010) 223-233

[3] Hu, X., Li, S., Peng, H.: A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. J. Power Sources 198 (2012) 359-367

[4] Farmann, A., Waag, W., Sauer, D.U.: Adaptive approach for on-board impedance parameters and voltage estimation of lithium-ion batteries in electric vehicles. J. Power Sources 299 (2015) 176-188

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[5] Farmann, A., Waag, W., Sauer, D.U.: Application-specific electrical characterization of high power batteries with lithium titanate anodes for electric vehicles. Energy 112 (2016) 294-306

[6] Waag, W., Fleischer, C., Sauer, D.U.: On-line estimation of lithium-ion battery impedance parameters using a novel varied-parameters approach. J. Power Sources 237 (2013) 260-269

[7] Waag, W., Fleischer, C., Sauer, D.U.: Adaptive on-line prediction of available power of lithium-ion batteries. J. Power Sources 242 (2013) 548-559.

[8] Pilatowicz, G., Budde-Meiwes, H., Kowal, J., Sarfert, C., Schoch, E., Königsmann, M., Sauer, D.U.: Determination of the lead-acid battery's dynamic response using Butler-Volmer equation for advanced battery management systems in automotive applications. J. Power Sources 331 (2016) 348-359

[9] S. Buller, Impedance-Based Simulation Models for Energy Storage Devices in Advanced Automotive Power Systems. Dissertation, Aachener Beiträge des ISEA (31) (2003)

[10] Illig, J.: Physically based Impedance Modelling of Lithium-Ion Cells. Dissertation. Karlsruhe Institute of Technology, Institute for Applied Materials - Materials for Electrical and Electronic Engineering (2014)

[11] Jossen, A.: Fundamentals of battery dynamics. J. Power Sources 154 (2006) 530-538

[12] Lvovich, V.F.: Impedance Spectroscopy: Applications to Electrochemical and Dielectric Phenomena. Hoboken, NJ, USA: Wiley (2012)

[13] Bard, A.J., Faulkner, L.R.: Electrochemical Methods – Fundamentals and Applications. Hoboken, NJ, USA: Wiley (2001)

[14] Andre, D., Meiler, M., Steiner, K., Wimmer, C., Soczka-Guth, T., Sauer, D.U.: Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation. J. Power Sources 196 (2011) 5334-5341

[15] Andre, D., Meiler, M., Walz, C., Soczka-Guth, T., Sauer, D.U.: Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. II. Modelling. J. Power Sources 196 (2011) 5349-5356

[16] Schmidt, J.P., Ivers-Tiffée, E.: Pulse-fitting – A novel method for the evaluation of pulse measurements, demonstrated for the low frequency behavior of lithium-ion cells. J. Power Sources 315 (2016) 316-323

[17] Schmidt, J.P., Berg, P., Schönleber, M., Weber, A., Ivers-Tiffée, E.: The distribution of relaxation times as basis for generalized time-domain models for Li-ion batteries. J. Power Sources 221 (2013), 70-77

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[18] Klotz, D., Schönleber, M., Schmidt, J.P., Ivers-Tiffée, E.: New approach for the calculation of impedance spectra out of time domain data. Electrochimica Acta 56 (2011) 8763-8769

[19] Ender, M., Illig J., Ivers-Tiffée, E.: Three-Electrode Setups for Lithium-Ion Batteries I. FEM-Simulation of Different Reference Electrode Designs and Their Implications for Half-Cell Impedance Spectra. J. Electrochemical Society 164 (2) (2017) A71-A79

[20] Costard, J., Ender, M., Weiss, M., Ivers-Tiffée, E.: Three-Electrode Setups for Lithium-Ion Batteries II. Experimental Study of Different Reference Electrode Designs and Their Implications for Half-Cell Impedance Spectra. J. Electrochemical Society 164 (2) (2017) A80-A87

[21] Schönleber, M., Ivers-Tiffée, E.: Approximability of impedance spectra by RC elements and implications for impedance analysis. Electrochemistry Communications 58 (2015) 15-19

[22] Schönleber, M., Ivers-Tiffée, E.: A method for Improving the Robustness of linear Kramers-Kronig Validity Tests. Electrochimica Acta 131 (2014) 20-27

[23] Schichlein, H., Müller, A.C., Voigts, M., Krügel, A., Ivers-Tiffée, E.: Deconvolution of electrochemical impedance spectra for the identification of electrode reaction mechanisms in solid oxide fuel cells. J. Applied Electrochemistry 32 (8) (2002) 875-882

[24] Illig, J., Ender, M., Weber, A., Ivers-Tiffée, E.: Modeling graphite anodes with serial and transmission line models. J. Power Sources 282 (2015) 335-347.

[25] Illig, J., Chrobak, T., Ender, M., Schmidt, J.P., Klotz, D., Ivers-Tiffée, E.: Studies on $LiFePO_4$ as Cathode Material in Li-Ion Batteries. ECS Transactions 28 (30) (2010) 3-17

[26] Pop, V., Bergveld, H.J., Op het Veld, J.H.G., Regtien, P.P.L., Danilov, D., Notten, P.H.L.: J. Electrochemical Society 153 (11) (2006) A2013-A2022

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Potenziale stochastischer modellgestützter prädiktiver Regelungsverfahren für das Energiemanagement von Hybridfahrzeugen auf Realfahrzyklen

Martina Joševski, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. **Dirk Abel**,
Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen University

Kurzfassung

Alternative Antriebskonzepte bieten große Potenziale im Hinblick auf einen ökologischeren und effizienteren Personentransport. Entscheidend für den effizienten Betrieb des elektrifizierten Antriebsstrangs ist dabei die richtige Betriebsstrategie. Insbesondere optimierungsbasierte Ansätze haben das Potenzial eine hohe Effizienz durch eine ganzheitliche Betrachtung der Fahrsituation und des Antriebsstrangs zu erzielen. Für den täglichen Nutzen des Kunden ist hierbei entscheidend, dass diese optimierungsbasierten Betriebsstrategien auch auf sog. Realfahrzyklen, d.h. auf der regulären Straße, und nicht nur auf dem Rollenprüfstand effizient anwendbar sind. Im Rahmen dieses Beitrags wird daher ein Konzept für das Energiemanagement von Parallelhybriden auf Realfahrzyklen basierend auf einer stochastischen Modellbasierten Prädiktiven Reglung (MPR) vorgestellt. Die Prädiktion des zukünftigen Fahrerwunschmoments, das für die Optimierung notwendiger Input ist, erfolgt hierbei auf Basis eines Fahrermodells und unter Verwendung von Navigationsdaten (wie z.B. Geschwindigkeitslimits). Die damit einhergehenden Unsicherheiten der Prädiktion werden bereits im Reglerdesign berücksichtigt. Eine simulationsbasierte Studie auf einem Realfahrzyklus belegt, dass die stochastische MPR-basierte Betriebsstrategie im Gegensatz zum nominalen Ansatz trotz Unsicherheiten im Fahrerwunschmoment ladungserhaltend ist und gleichzeitig ebenso einen verbesserten äquivalenten Kraftstoffverbrauch aufweist.

1. Einleitung

Alternative Antriebskonzepte gewinnen heutzutage zunehmend an Bedeutung. Diese Entwicklung ist zum einen durch die immer striktere Regulierung von Abgasemissionen durch den Gesetzgeber bedingt, zum anderen aber auch durch das zunehmende Interesse an ökologischen Technologien. Aufgrund der meist sehr beschränkten Reichweite rein batterieelektrischer Fahrzeuge im Vergleich zu konventionellen verbrennungsmotorisch

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

betriebenen Fahrzeugen, stellen (Plug-in) Hybridfahrzeuge eine adäquate Alternative dar. Durch die Elektrifizierung des Antriebstrangs kann damit neben einer hohen Reichweite auch eine deutliche Effizienzsteigerung erreicht werden. Diese geht wiederum aufgrund zusätzlicher Freiheitsgrade mit einer Komplexitätssteigerung des Antriebsstrangs einher. Zur Maximierung des Wirkungsgrades sind daher komplexere Betriebsstrategien für das Energiemanagement erforderlich. Während heutzutage in der Serienentwicklung aus Gründen der eingeschränkten Rechen- und Speicherkapazität meist heuristische Betriebsstrategien zum Einsatz kommen, bieten optimierungsbasierte Ansätze die Möglichkeit eine deutlich höhere Gesamteffizienz zu erzielen [1].

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein stochastischer optimierungsbasierter Ansatz für das Energiemanagement eines Parallelhybriden auf Realfahrzyklen diskutiert. Die Modellbasierte Prädiktive Regelung (MPR) [2] stellt in diesem Zusammenhang eine adäquate optimierungsbasierte Methodik zur Lösung des Energiemanagement-Problems dar [3]. Dabei wird über einen begrenzten zeitlichen Horizont die Aufteilung der Momente zwischen den Antriebsmaschinen so optimiert, dass der Kraftstoffverbrauch minimiert und zudem die Betriebsstrategie ladungserhaltend ist (d.h. der Ladezustand am Ende des Zyklus entspricht dem initialen Zustand). Simultan werden zudem die technischen Beschränkungen der Antriebsmaschinen sowie der Batterie in der Betriebsstrategie berücksichtigt. Für diese Optimierung ist inhärent die Verfügbarkeit des Fahrerwunschmoments über den Optimierungshorizont erforderlich. Dabei ist die Güte der Prädiktion des Fahrerwunschmoments von entscheidender Bedeutung. Bei Verwendung einer stark von der Realität abweichenden Prädiktion, erfolgt die Optimierung folglich auf Basis falscher Grundannahmen, was dann beispielsweise eine zu hohe Energieentnahme aus der Traktionsbatterie zur Folge haben kann und dementsprechend dem Ziel der Ladungserhaltung entgegenwirkt. Folglich können eine unbeabsichtigt tiefe Entladung der Batterie bzw. auch Verletzungen der Beschränkungen des Optimierungsproblems auftreten. Diese Probleme sollten durch die Verwendung des stochastischen Ansatzes verhindert werden.

2. Systemkonzept

Während sich das zukünftige Fahrerwunschmoment auf künstlichen Fahrzyklen wie z.B. dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) mit hoher Güte aus dem Zyklus berechnen lässt, ist dies im Fall von Realfahrzyklen nicht gegeben. Auf Realfahrzyklen besteht daher die Herausforderung eine möglichst gute Schätzung des zukünftigen Fahrerwunschmoments zu

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

ermitteln. Um ein entsprechendes Energiemanagementkonzept für Realfahrzyklen darzustellen, werden im vorliegenden Konzept die folgenden Komponenten verwendet:

1. Navigationssystem / elektronischer Horizont:
   Das Navigationssystem stellt die auf der Route befindlichen Geschwindigkeitslimits dem Schätzalgorithmus für das zukünftige Fahrerwunschmoment zur Verfügung.
2. Prädiktion des zukünftigen Fahrerwunschmoments:
   Dieser Algorithmus ermittelt auf Basis der vorausliegenden Geschwindigkeitslimits sowie eines Fahrermodells eine geschätzte Trajektorie für das Fahrerwunschmoment am Rad und stellt diese der MPR-basierten Betriebsstrategie zwecks Optimierung zur Verfügung.
3. MPR-basiertes Energiemanagement:
   Die stochastische MPR-basierte Betriebsstrategie optimiert die Kraftstoffeffizienz des Antriebsstrangs unter Berücksichtigung der technischen Grenzen des Antriebsstrangs sowie unter Berücksichtigung der Unsicherheiten im zukünftigen Fahrerwunschmoment. Als Ausgangsgrößen werden dem HEV Antriebsstrang die Antriebsmomente der Verbrennungskraftmaschine (VKM), der E-Maschine sowie das Reibbremsmoment übergeben.

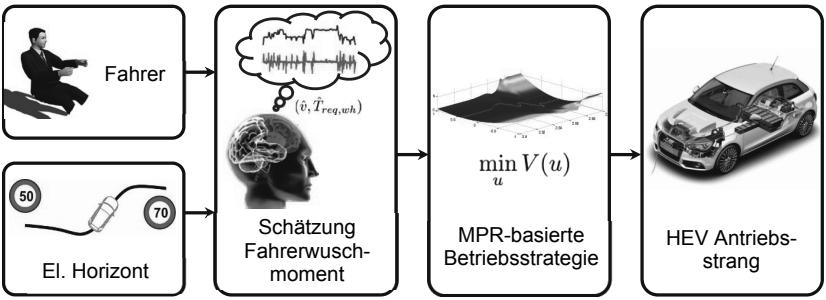


Bild 1: Struktur des Regelungskonzepts

Die Schätzung des Fahrerwunschmoments wird im Folgenden als gegeben angenommen und nicht weiter im Detail analysiert, da diese nicht Gegenstand des Beitrags ist. Weitere Informationen zur Funktionsweise und Implementierung dieser Teilfunktionen finden sich für den interessierten Leser in [4].

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3. Modellierung des Antriebsstrangs

Bei der betrachteten Antriebsstrangkonfiguration handelt es sich um einen Parallelhybriden, sodass sowohl die VKM als auch die E-Maschine mechanisch über das Getriebe und Achsdifferential mit der Antriebsachse verbunden sind. Mechanisch lässt sich das Moment am Rad T_{wh} wie folgt darstellen:

$$T_{wh} = \begin{cases} \eta_{gb} \cdot i_{gb}(n) \cdot (T_{ice} + T_{em}) - T_{br}, & T_{gb,in} \geq 0 \\ 1/\eta_{gb} \cdot i_{gb}(n) \cdot (T_{ice} + T_{em}) - T_{br}, & T_{gb,in} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

In diesem Zusammenhang stellen η_{gb} die Effizienz des Getriebes inkl. Achsdifferential, $i_{gb}(n)$ das Übersetzungsverhältnis des Getriebes inkl. Achsdifferential in Gang n, T_{ice} das Drehmoment der VKM, T_{em} das Drehmoment der E-Maschine, T_{br} das Reibbremsmoment und $T_{gb,in}$ das Getriebeeingangsmoment dar. Des Weiteren wird die VKM in einem quasi-statischen Ansatz [1] über den Kraftstoffmassenstrom $\dot{m}_f$ modelliert, der von der Drehzahl ω_{ice} und dem Drehmoment T_{ice} der VKM abhängt. Dieser kann für Optimierungszwecke über ein Polynom 3. Grades approximiert werden:

$$\dot{m}_f(\omega_{ice}, T_{ice}) = f_{\dot{m}_f}(\omega_{ice}, T_{ice}) \approx \sum_{i=0}^{3} \sum_{j=0}^{3} a_{i,j} \cdot \omega_{ice}^{i} \cdot T_{ice}^{j} \quad (2)$$

Auf ähnliche Weise wird die Ein- und Ausgangsleistung P_{em} der E-Maschine über ein Polynom 3. Grades in Abhängigkeit der Drehzahl ω_{em} und des Drehmoments T_{em} angenähert:

$$P_{em}(\omega_{em}, T_{em}) = f_{P_{em}}(\omega_{em}, T_{em}) \approx \sum_{i=0}^{3} \sum_{j=0}^{3} b_{i,j} \cdot \omega_{em}^{i} \cdot T_{em}^{j} \quad (3)$$

Die Dynamik des Ladezustands der Batterie (engl. State of Charge, SoC) wird gemäß [1] über ein Ersatzschaltbild als

$$\dot{SoC} = \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4 \cdot R_i \cdot P_{em}}}{2 \cdot R_i \cdot Q_{bat}} \quad (4)$$

modelliert, wobei U_{oc} die Open Circuit Spannung der Batterie und R_i den Innenwiderstand, beide Funktionen des SoC, darstellen. Schlussendlich bezeichnet Q_{bat} die maximale Ladung der Batterie. Zur Beschreibung der Fahrzeuglängsdynamik über die Längsgeschwindigkeit v wird das Fahrzeug als Punktmasse approximiert [1] und die wirkenden Antriebsstrangkräfte sowie die Fahrwiderstände am Schwerpunkt bilanziert. Dieses nichtlineare Modell wird für die Regelung zu jedem Abtastzeitpunkt k linearisiert, so dass ein linear zeitvariantes Modell

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

resultiert. Dieses Modell verfügt mit $x = [v, SoC]^T$ über zwei Systemzustände, mit $u = [T_{ice}, T_{br}]^T$ über zwei Eingänge (T_{em} ergibt sich explizit aus (1)) und mit $y = \left[\dot{m}_f, SoC\right]^T$ über zwei Ausgänge. Des Weiteren existieren zwei exogene Störgrößen $w = [w_1, w_2]^T = \left[T_{wh,req}, i_{gb}(n)\right]^T$, die durch das Fahrerwunschmoment $w_1 = T_{wh,req}$ und das Übersetzungsverhältnis $w_2 = i_{gb}(n)$ gegeben sind. Die Gangwahl erfolgt jedoch über eine externe Gangwahllogik, die nicht Gegenstand dieses Beitrags ist.

4. Nominale MPR-basierte Betriebsstrategie ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten

Wie zuvor ausgeführt, ist das Ziel der Betriebsstrategie die Momente unter den Antriebsmaschinen sowie der Reibbremse so aufzuteilen, dass das Fahrerwunschmoment erfüllt wird, die technischen Randbedingungen des Antriebsstrangs berücksichtigt werden und der Betrieb des Antriebstrangs dabei möglichst effizient erfolgt. In diesem Beitrag wird dazu die Modellbasierte Prädiktive Regelung verwendet. In diesem Ansatz können die o.g. Ziele in Form eines Optimierungsproblems unter Nebenbedingungen formuliert werden und somit das Energiemanagementproblem ganzheitlich abbilden. Die grundlegende Idee der MPR besteht in der modellbasierten Prädiktion des Systemverhaltens zum Zeitpunkt k über einen Prädiktionshorizont der Länge H_p und der Wahl der Stellgrößen über einen Stellhorizont der Länge $H_u \leq H_p$, sodass ein gegebenes Kostenfunktional minimiert wird und die zugehörigen Nebenbedingungen erfüllt sind. Aus der Stellgrößensequenz wird das erste Element an die Strecke übergeben und zum nachfolgenden Zeitpunkt $k + 1$ wird diese Prozedur wiederholt. Relevant für die Optimierung ist dabei die zugrunde liegende Trajektorie des Fahrerwunschmoments $w_{1,(\cdot|k)} = T_{wh,req,(\cdot|k)}$ über den Prädiktionshorizont.

Da diese für Realfahrzyklen geschätzt wird, kann diese je nach Fahrsituation einer signifikanten Unsicherheit unterliegen, so dass diese bereits im Regelungsansatz berücksichtigt werden sollten. Andernfalls können diese Unsicherheiten zu einer ungewünschten Entladung der Batterie durch zu häufige Nutzung des elektrischen Pfads und damit zu einer verschlechterten Gesamteffizienz führen. Ferner können Beschränkungen des Antriebsstrangs verletzt werden. Das Konzept einer Betriebsstrategie, die diese Unsicherheiten berücksichtigt, wird in diesem Kapitel näher erläutert. Um zunächst einen besseren Überblick über das eigentliche Energiemanagementproblem zu verschaffen, wird zunächst die nominale Betriebsstrategie betrachtet, die diese Unsicherheiten vernachlässigt. In einem zweiten Schritt wird diese no-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

minale Strategie dann zu einem stochastischen Ansatz erweitert, der ebenso die Unsicherheit berücksichtigt.

Die allgemeinen Ziele der Betriebsstrategie – unabhängig von eventuellen Unsicherheiten - lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Minimierung des Kraftstoffverbrauchs über den Fahrzyklus.
2. Erhaltung des Ladezustands der Batterie, d.h. initialer SoC ≈ finaler SoC am Ende des Zyklus.
3. Maximierung der Rekuperation und Vermeidung der Nutzung der Reibbremse.
4. Vermeidung von Sprüngen in den Transienten der Antriebsmaschinen.

Diese Ziele lassen sich in Form einer quadratischen Kostenfunktion zusammenfassen:

$$J(\Delta u_{(\cdot|k)}) \triangleq Q_{m_f} \cdot \sum_{j=0}^{H_p} T_s \, \dot{m}_{f,(k+j|k)} + Q_{SoC} \cdot \sum_{j=1}^{H_p} (SoC_{(k+j|k)} - SoC_{ref})^2 + \sum_{j=0}^{H_u-1} \Delta u_{(k+j|k)}^T \, R \, \Delta u_{(k+j|k)} + \sum_{j=0}^{H_u-1} u_{(k+j|k)}^T \, S \, u_{(k+j|k)} \tag{5}$$

Die Kostenfunktion (5) ist dabei in Abhängigkeit der Änderung $\Delta u_{(\cdot|k)} = \left[\Delta u_{(k|k)}, \dots, \Delta u_{(k+H_u-1|k)}\right]^T$ der Stellgrößen formuliert. Der erste Term in (5) entspricht dabei dem Kraftstoffverbrauch über den Prädiktionshorizont, der zweite Term der Abweichung des SoC vom Sollwert, während die letzten beiden Terme die Anforderungen 3.-4. abbilden. Q_{m_f}, Q_{SoC}, R und S sind Gewichtungskoeffizienten bzw. Gewichtungsmatrizen. Neben diesen Zielen sind des Weiteren die folgenden Nebenbedingungen zu erfüllen:

- Min./max. Moment der VKM: $0 \leq T_{ice,(k+j|k)} \leq T_{ice,max}(\omega_{ice})$ (5a)
- Min./max. Moment der E-Maschine: $T_{em,min}\left(\omega_{em,(k+j|k)}\right) \leq T_{em,(k+j|k)}$, $T_{em,max}\left(\omega_{em,(k+j|k)}\right) \geq T_{em,(k+j|k)}$ (5b)
- Nutzbares SoC-Intervall: $SoC_{min} \leq SoC_{(k+j|k)} \leq SoC_{max}$ (5c)

Die Nebenbedingungen (5a)-(5b) sind für alle $j \in \{0, \dots, H_u - 1\}$ zu erfüllen, für (5c) gilt dies für alle $j \in \{1, \dots, H_p\}$. Die Stellgröße kann nun durch Minimierung von (5) unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen 1.-3. ermittelt werden. Das resultierende Optimierungsproblem ist ein quadratisches Programm (QP), das sehr effizient gelöst werden kann [10]. Nach Be-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

stimmung der Lösung des Optimierungsproblems, ergibt sich die Stellgröße, die dem Antriebsstrang übergeben wird, aus dem Zusammenhang $u_k = u_{k-1} + \Delta u_{(k|k)}$.

5. Stochastische MPR-basierte Betriebsstrategie

Nach Einführung der nominalen Betriebsstrategie, die keine Unsicherheiten $\Delta w_{1,(\cdot|k)}$ in der Trajektorie $w_{1,(\cdot|k)} = T_{wh,req,(\cdot|k)}$ des Fahrerwunschmoments berücksichtigt, wird diese im Rahmen dieses Kapitels nun zu einer stochastischen MPR-basierten Betriebsstrategie erweitert. Für die generelle Berücksichtigung von Unsicherheiten in einem MPR-basierten Regelungskonzept existieren diverse Konzepte in der Literatur. Während robuste Ansätze [5,6] den Worst Case der Unsicherheit betrachten und somit recht konservativ sind, haben sich in der jüngeren Vergangenheit stochastische Verfahren [7,8,9] etabliert, die die Unsicherheit als stochastische Größe interpretieren und eine geringes Maß an Konservatismus aufweisen.

In diesem Beitrag wird ein stochastischer MPR-basierten Regelungsansatz präsentiert, der der Theorie nach einem Szenario-basierten Ansatz nach [8] folgt. Dafür wird im Folgenden angenommen, dass sich die exogene Störung $w_{1,k} = T_{wh,req,k}$ zu jedem Zeitpunkt k in einen nominalen, bekannten Anteil $\overline{w}_{1,k} = \overline{T}_{wh,req,k}$ und einen unsicheren, unbekannten Anteil $\Delta w_{1,k} = \Delta T_{wh,req,k}$ zerlegen lässt. Das generelle Prinzip des Szenario-basierten Ansatzes lässt sich dann wie folgt skizzieren.

Schätzung des zukünftigen Fahrerwunschmoments

Wie im nominalen Fall wird die zukünftige nominale Fahrerwunschmomenttrajektorie $\overline{w}_{1,(\cdot|k)} = \overline{T}_{wh,req,(\cdot|k)}$ geschätzt und der Betriebsstrategie zur Verfügung gestellt.

Generierung von Szenarien

Es werden nun Abweichungen $\Delta w_{1,(\cdot|k)} = \Delta T_{wh,req,(\cdot|k)}$ vom nominalen Fahrerwunschmoment über den Prädiktionshorizont zufallsbasiert generiert. Die einzelnen Samples sind dabei voneinander unabhängig sowie gleichverteilt über dem beschränkten Intervall $W_{1,k} \triangleq \left[\Delta w_{1,k,min},\, \Delta w_{1,k,max}\right]$. Die Sequenz $\sigma_k{}^{[\kappa]} \triangleq \left(\Delta w^{[\kappa]}_{1,(k|k)}, \dots, \Delta w^{[\kappa]}_{1,(k+H_p-1|k)}\right)$ zum Zeitpunkt k wird dabei als Szenario $\kappa \in \{1, \dots, K\}$ definiert und kann als eine mögliche Realisierung der Unsicherheit betrachtet werden. Für jedes Szenario κ ergibt sich damit die Trajektorie der Fahrerwunschmomente über dem Prädiktionshorizont als $w^{[\kappa]}_{1,(\cdot|k)} = \left[w_{1,(k|k)} + \Delta w^{[\kappa]}_{1,(k|k)}, \dots, w_{1,(k+H_p-1|k)} + \Delta w^{[\kappa]}_{1,(k+H_p-1|k)}\right]^T$. Dieses Vorgehen ist in *Bild 2* skizziert.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

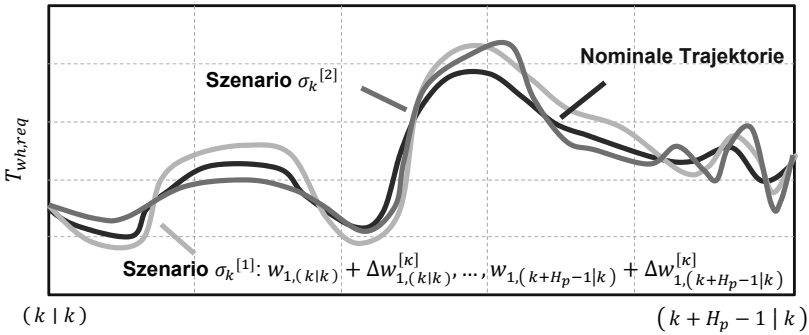


Bild 2: Illustration des Szenarien-Generierung

Das Sample-Intervall $W_{1,k} \triangleq \left[\Delta w_{1,k,min}, \Delta w_{1,k,max}\right]$ bestimmt bei der Szenarien-Generierung maßgeblich die Streuung der resultierenden Trajektorien. Da für alle Szenarien auch alle Systembeschränkungen erfüllt sein müssen (siehe Abschnitt Szenario-spezifische Nebenbedingungen), bestimmt die Größe des Intervalls $W_{1,k}$ inhärent wie konservativ sich die Betriebsstrategie verhält. Zur Bestimmung der Intervallgrenzen, wird zu jedem Zeitpunkt k der Schätzfehler zwischen dem tatsächlichem und geschätztem Fahrerwunschmoment, d.h. $e_k = T_{wh,req,k} - \overline{T}_{wh,req,k}$ berechnet. Die Intervallgrenzen ergeben sich dann im Wesentlichen aus dem Minimum bzw. Maximum der über einem Fenster der Länge $L_{W_{1,k}}$ gespeicherten Schätzfehler.

$$\begin{aligned} \Delta w_{1,k,min} &\triangleq \min_{i \in \left\{0,\dots,L_{W_{1,k}}-1\right\}} \{e_{k-i}, 0\} \in \mathbb{R}_{\leq 0} \\ \Delta w_{1,k,max} &\triangleq \max_{i \in \left\{0,\dots,L_{W_{1,k}}-1\right\}} \{e_{k-i}, 0\} \in \mathbb{R}_{\geq 0} \end{aligned} \tag{6}$$

Durch eine derartige Adaption des Intervalls $W_{1,k}$ wird auch der Konservatismus der Betriebsstrategie adaptiert. Im konkreten Fall bedeutet dies, dass bei verschwindend kleinen Schätzfehlern auch $\Delta w_{1,k,min}$ und $\Delta w_{1,k,max}$ gegen Null konvergieren. Die stochastische MPR verhält sich dann wie die nominale MPR. Darüber hinaus wird deutlich, dass der Konservatismus nur dann erhöht wird, wenn sich die Untersicherheiten im prädizierten Fahrerwunschmoment ebenfalls erhöhen.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Szenario-spezifische Nebenbedingungen

Im dritten Schritt des Szenario-basierten Ansatzes müssen für jedes Szenario $\kappa \in \{1, \dots, K\}$ die Nebenbedingungen (5a)-(5c) des nominalen Optimierungsproblems erfüllt werden. Im vorliegenden Problem hängen sowohl der SoC als auch die Grenzen der VKM sowie der elektrischen Maschine von der Störung $w_1 = T_{wh,req}$ ab. Aus diesem Grund sind die Szenario-Beschränkung wie folgt aus den ursprünglichen Nebenbedingungen abzuleiten:

- Min./max. Moment der VKM: $$0 \leq T_{ice,(k+j|k)} \leq T_{ice,max}\left(\omega_{ice}^{[\kappa]}\right) \quad (7a)$$
- Min./max. Moment der E-Maschine: $$T_{em,min}\left(\omega_{em,(k+j|k)}^{[\kappa]}\right) \leq T_{em,(k+j|k)} \leq T_{em,max}\left(\omega_{em,(k+j|k)}^{[\kappa]}\right) \quad (7b)$$
- Nutzbares SoC-Intervall: $$SoC_{min} \leq SoC_{(k+j|k)}^{[\kappa]} \leq SoC_{max} \quad (7c)$$

Durch die Formulierung der Nebenbedingungen unter Berücksichtigung aller Szenarien $\kappa \in \{1, \dots, K\}$, kann für jede Nebenbedingungen auch eine obere Schranke für die Wahrscheinlichkeit angegeben werden, dass diese Beschränkung verletzt wird. Gemäß [8] ist diese im vorliegenden Anwendungsfall durch $2/(1+K)$ beschränkt, wobei K die Anzahl der Szenarien beschreibt. D.h. für den Fall, dass die Beschränkungen mit eine Wahrscheinlichkeit von max. 1% verletzt werden, sind $K = 199$ Szenarien erforderlich.

Szenario-Optimierung

Als letzten Schritt ist die Kostenfunktion (5) auf den Szenario-basierten Ansatz anzupassen. Nachdem bereits alle Szenarien generiert wurden und auch alle Nebenbedingungen des ursprünglichen Optimierungsproblems für alle Szenarien definiert wurden, wird in der Szenario-Optimierung über die Summe aller Szenario-Kosten

$$\sum_{\kappa \in \{1,\dots,K\}} J^{[\kappa]}(\Delta u_{(\cdot|k)}) \quad (8)$$

unter Berücksichtigung der Szenario-Beschränkungen (7a)-(7c) optimiert. Im Allgemeinen verfügt dieses Optimierungsproblem über K mal mehr Nebenbedingungen als das nominale Optimierungsproblem. Für das HEV Energiemanagement Problem lässt sich jedoch zeigen, dass die Anzahl der Nebenbedingungen durch geeignetes Zusammenfassen auf dieselbe Anzahl an Beschränkungen wie im nominalen Fall reduzieren lässt. Damit verfügt das resultierende stochastische Optimierungsproblem über dieselbe Anzahl an Nebenbedingungen und damit dieselbe Komplexität. Dementsprechend kann dies ebenso als QP sehr effizient

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

gelöst werden. Lediglich die Szenario-Generierung erhöht die Rechenzeit im Vergleich zum nominalen Fall.

6. Simulationsergebnisse

Zur Validierung, ob die stochastische, Szenario-basierte MPR (im Folgenden abgekürzt als SZMPR) bessere Ergebnisse in Bezug auf Kraftstoffverbrauch, Ladungserhaltung sowie Erfüllung der Beschränkungen erzielt als die nominale MPR (im Folgenden abgekürzt als NomMPR), wurde eine Simulationsstudie auf einem 2,7 GHz IntelCore i5 Laptop mit Matlab 2015b durchgeführt. Das Fahrermodell zur Schätzung des zukünftigen Fahrerwunschmoments wurde auf einem großen Datensatz gelernt, der sowohl urbane Abschnitte, Landstraßen als auch Autobahnanteile umfasst. Der im Folgenden untersuchte Realfahrzyklus entstammt nicht diesem Trainingsdatensatz und verfügt damit auch über größere Unsicherheiten in Bezug auf das prädizierte Moment. Für SZMPR und NomMPR wurde eine Abtastzeit von 1s bei gleicher Parametrierung gewählt: $Q_{m_f} = 1, Q_{SoC} = 300$, $r_{\Delta \mathrm{T_{ice}}} = 0{,}01$, $r_{\Delta \mathrm{T_{br}}} = 0$, $s_{T_{ice}} = 0$, $s_{T_{br}} = 1$. Der Referenzwert des Batterieladezustands beträgt $SoC_{ref} = 0{,}6$, die SoC-Grenzen wurden auf $SoC_{min} = 0{,}5$ und $SoC_{max} = 0{,}7$ festgesetzt. Des Weiteren wurden für den Prädiktions- und Stellhorizont eine Länge von 10 Schritten / 10 Sekunden verwendet.

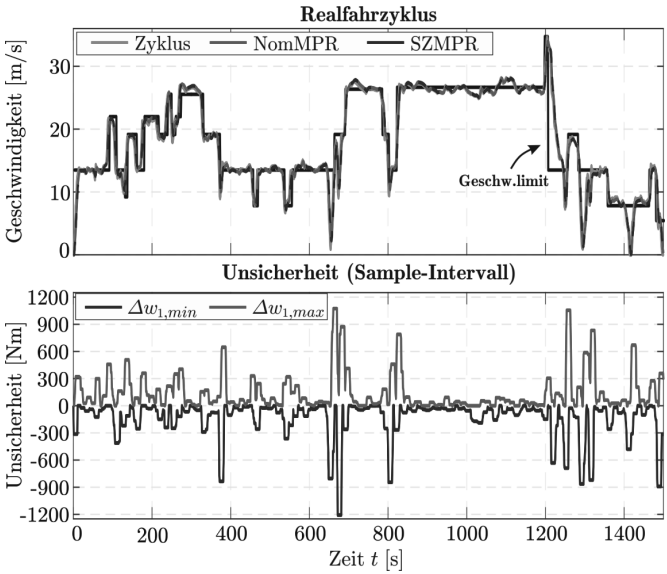


Bild 3: Realfahrzyklus und Sample-Intervall

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Als QP Solver kommt in beiden MPR-Varianten qpOASES [11] zum Einsatz. Die Szenario-basierte MPR verwendet $K = 199$ Szenarien, sodass die max. Wahrscheinlichkeit für die Verletzung von Nebenbedingungen der Optimierung 1% beträgt. Die Fensterlänge $L_{W_{1,k}}$ zur Bestimmung der Intervallgrenzen von $W_{1,k}$ stimmt mit der Länge des Prädiktionshorizonts überein.

Bild 3 illustriert den untersuchten Realfahrzyklus sowie die Grenzen des Sample-Intervalls $W_{1,k} \triangleq [\Delta w_{1,k,min}, \Delta w_{1,k,max}]$. Diese Grenzen zeigen auf, dass die Schätzung des Fahrerwunschmoments im Allgemeinen sehr gute Ergebnisse liefert, obwohl in einigen Zeitabschnitten größere Fehler von bis zu ca. $1000\,Nm$ (entspricht ca. $2\,m/s^2$) auftreten. Diese Fehler entstehen im Wesentlichen durch nicht vorsehbares Verhalten des Fahrers und müssen daher von der Betriebsstrategie berücksichtigt werden.

Abbildung 4 stellt im Folgenden die Ausgangsgrößen des Systems, d.h. den Batterieladezustand sowie den Kraftstoffverbrauch dar. Es wird deutlich, dass SZMPR mit einem finalen SoC von 0,609 ladungserhaltend ist während NomMPR mit einem finalen SoC von 0,551 dieses Ziel nicht erreicht. Zugleich verbraucht SZMPR mit 579,1g 5,37% mehr Kraftstoff als

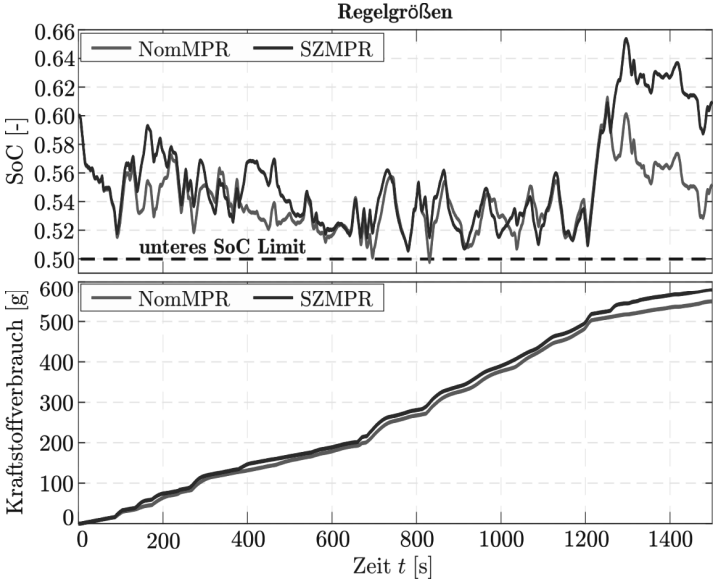


Bild 4: Regelgrößen des hybriden Antriebsstrangs

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

NomMPR mit 549,6g. In Bezug auf äquivalenten Kraftstoffverbrauch ist SZMPR jedoch in der Lage, einen 1% niedrigeren Verbrauch (SZMPR: 573,6g; NomMPR: 579,4g) vorzuweisen. Es kann des Weiteren festgestellt werden, dass NomMPR für $t = 820s$ die untere Grenze des SoC verletzt, wohingegen diese Situation unter Verwendung der stochastischen Strategie vermieden werden kann. Bei genauerer Betrachtung ist ersichtlich, dass in Bereichen, in den der tatsächliche Fahrerwunsch unterschätzt wird ($\Delta w_{1,max}$ ist groß, z.B. für $t = 120s, 380s, 650s, 1250s, 1300s$), SZMPR verstärkt die VKM anstatt der E-Maschine nutzt. Bei Überschätzung des tatsächlichen Fahrerwunschmoments und gleichzeitig negativem Fahrerwunschmoment, d.h. bei großen absoluten Werten von $\Delta w_{1,min}$ kann aufgrund des Abstands zur oberen SoC-Grenze jedoch keine Nutzung der Reibbremse anstatt der E-Maschine festgestellt werden.

Abschließend kann noch festgestellt werden, dass SZMPR mit einer durchschnittlichen Rechenzeit von 4,9ms (NomMPR: 2,6ms) sowie einer max. Rechenzeit von 10,1ms (NomMPR: 4,0ms) auf der verwendeten Simulationshardware echtzeitfähig ist. Die zusätzliche Rechenzeit im Vergleich zu NomMPR resultiert im Wesentlichen aus der Szenario-Generierung, kann aber im Kontext nahezu vernachlässigt werden. Insgesamt kann damit festgestellt werden, dass die stochastische MPR-basierte Betriebsstrategie auf Realfahrzyklen über deutliche Vorteile gegenüber einer konventionellen, nominalen Strategie verfügt, die keine Kenntnis von der Unsicherheit hat.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags eine Betriebsstrategie für Realfahrzyklen vorgestellt. Im Gegensatz zu künstlichen Fahrzyklen, die im Wesentlichen auf dem Rollenprüfstand untersucht werden, stellen Realfahrzyklen den realen Nutzenfall des Kunden dar. Eine besondere Herausforderung bei Nutzung von optimierungsbasierten Betriebsstrategien stellt dabei die nur unsicherere Kenntnis des zukünftigen Fahrerwunschmoments dar. Eine Optimierung ohne Berücksichtigung dieser Unsicherheiten kann zu einer ungewollten Entladung der Batterie, zur verschlechterten äquivalenten Kraftstoffverbräuchen und zur Verletzung von Systembeschränkungen führen. Aus diesem Grund wurde eine stochastische MPR-basierte Betriebsstrategie vorgestellt, die diese Unsicherheiten bereits im Reglerentwurf aufgreift. Eine simulationsbasierte Studie zeigt abschließend das Potenzial des stochastischen Ansatzes und die Vorteile gegenüber einem konventionellen Ansatz, der diese Unsicherheiten vernachlässigt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Im Rahmen zukünftiger Arbeiten sollen weitere Analysen auf zusätzlichen Realfahrzyklen durchgeführt und mit weiteren stochastischen und robusten Verfahren verglichen werden. Des Weiteren ist die Evaluierung der stochastischen Betriebsstrategie in einer dSPACE HiL Umgebung vorgesehen.

Literatur:

[1] L. Guzzella and A. Sciaretta, “Vehicle Propulsion Systems”, Springer, 2013.

[2] J. Maciejowski, “Predictive Control with Constraints”, Prentice Hall, Harlow, 2002.

[3] Y. Huang, H. Wang, A. Khajepour, H. He, Ji. Ll, “Model predictive control power management strategies for HEVs: A review”, Journal of Power Sources, Volume 341, Pages 91-106, 2016

[4] M. Joševski and D. Abel, “Tube-based MPC for the Energy Management of Hybrid Electric Vehicles with Non-Parametric Driving Profile Prediction,” in IEEE American Control Conference, July 2016, pp. 623-630.

[5] A. Bemporad and M. Morari, “Robust Model Predictive Control: A Survey,” Robustness in Identification and Control, vol. 245, pp. 207–226, 1999.

[6] M. Cannon, J. Buerger, B. Kouvaritakis, and S. V. Rakovic, “Robust tubes in nonlinear model predictive control,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 56, no. 8, pp. 1942–1947, 2011.

[7] B. Kouvaritakis and M. Cannon, “Stochastic model predictive control”, Encyklopedia of Systems and Control, Springer, 2014.

[8] G. Schildbach, L. Fagiano, C. Frei, and M. Morari, “The Scenario Approach for Stochastic Model Predictive Control with Bounds on Closed-Loop Constraint Violations,” Automatica, vol. 50, no. 12, pp. 3009 – 3018, 2014.

[9] M. Joševski and D. Abel, “Chance constrained stochastic MPC with additive disturbance as robust charge-sustaining strategy for hybrid electric vehicles,” in IEEE European Control Conference, 2015.

[10] S. Boyd and L. Vandenberghe, “Convex Optimization”, Cambridge University Press, 2004

[11] H. Ferreau, C. Kirches, A. Potschka, H. Bock, and M. Diehl, “qpOASES: A parametric active-set algorithm for quadratic programming,” Mathematical Programming Computation, vol. 6, no. 4, pp. 327–363, 2014.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Multikriterielle Betriebsstrategie für Hybrid Antriebsstränge

Multi-objective Powertrain Operation Strategy

M.Sc. **Jiao Li**, Dipl.-Ing. **Thomas Huber**,
Robert Bosch GmbH, Stuttgart;
Prof. Dr. techn. **Christian Beidl**, Technische Universität Darmstadt

Kurzfassung

Um die strenger werdenden Anforderungen an CO_2-Emissionen zu erfüllen, ist die Elektrifizierung ein wichtiger Bestandteil für den Antriebsstrang geworden. Um Vorteile aus der Elektrifizierung zu realisieren, wird eine Betriebsstrategie benötigt, die den Betrieb des Antriebsstrangs optimiert. Das typische Optimierungsziel ist dabei die Minimierung von CO_2-Emissionen. Damit weitere wichtige Kriterien, wie z.B. niedrige Schadstoffemissionen oder lange Lebensdauer bestimmter Komponenten, dadurch nicht verschlechtert werden, kann die Optimierung um diese zusätzlichen Kriterien erweitert werden. Der hier vorgestellte Anwendungsfall ist die gleichzeitige Minimierung von CO_2-Emissionen und der zyklischen Alterung der Traktionsbatterie für ein bestimmtes Fahrprofil.
In diesem Artikel werden die bekannte Optimierungsalgorithmen „Dynamic Programming“ (DP) und „Equivalent Consumption Minimization Strategy“ (ECMS) implementiert. Durch unterschiedliche Gewichtung einzelner Teilziele im Optimierungsproblem werden die PARETO-Fronten ermittelt, die jeweils die optimalen Kompromisse zwischen den Teilzielen beschreiben. Anhand diesen PARETO-Fronten werden die unterschiedlichen Optimierungsalgorithmen miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass durch die multikriterielle Betriebsstrategie die zyklische Alterung der Traktionsbatterie verbessert werden kann, während sich hingegen die CO_2-Emissionen erhöhen. Die multikriterielle Betriebsstrategie kann noch nach der Größe des Gewichtungsfaktors für Batteriealterung entscheiden, nur die Momentenaufteilung zwischen dem Verbrennungsmotor und dem elektrischen Antrieb beim Antrieb oder auch die Momentenaufteilung zwischen der Reibbremse und dem elektrischen Antrieb beim Bremsen zu optimieren.

Abstract

Due to the more stringent requirements on CO_2 emissions, electrification has become an important part of the powertrain. In order to realize advantages of electrification, an operation strategy is required, which can optimize the operation of the powertrain. The typical optimization goal is to minimize CO_2 emissions. Considering other important criteria, e.g., low pollutant emissions or long lifetime of

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

certain components, the optimization should be extended by these additional criteria. The use case in this paper is the minimization of CO_2 emissions and the cyclic ageing of the traction battery for a definite driving profile.
In this paper the well-known optimization algorithms „Dynamic Programming“ (DP) and „Equivalent Consumption Minimization Strategy“ (ECMS) are implemented. The Pareto front, which describes the optimal compromises between the partial goals, is determined by different weighting of individual sub-goals in the optimization problem. The different optimization algorithms are compared by using these Pareto fronts. It is shown that the multi-objective operation strategy can reduce the cyclic ageing of the battery while increasing the CO_2 emissions. The multi-objective operation strategy can decide to optimize only the torque split between the internal combustion engine and the electric machine during driving or also the torque split between the friction brake and the electric machine during braking, according to the weighting factor for battery ageing.

1. Einleitung

Die immer strenger werdenden Anforderungen an die CO_2- und Schadstoffemissionen sind große Herausforderungen in der Automobilindustrie. In den letzten Jahren sind die Herausforderungen bezüglich der Real Driving Emissions (RDE) deutlich kritischer geworden. Infolgedessen hat die Elektrifizierung des Antriebsstrangs zunehmend an Bedeutung gewonnen. Um Vorteile aus der Elektrifizierung zu realisieren, wird eine Betriebsstrategie benötigt, die den Betrieb des Powertrains optimiert. Das typische Optimierungsziel für eine Betriebsstrategie ist die Minimierung von CO_2-Emissionen. Damit weitere wichtige Kriterien, wie z.B. niedrige Schadstoffemissionen oder die lange Lebensdauer bestimmter Komponenten, dadurch nicht verschlechtert werden, kann die Optimierung um diese zusätzlichen Kriterien erweitert werden [1]. Die Traktionsbatterie wird als ein wesentlicher Bestandteil von Hybridfahrzeugen betrachtet. Der Kapazitätsverlust infolge der Batteriealterung beeinflusst nicht nur die Lebensdauer der Traktionsbatterie, sondern auch die CO_2-Emissionen. Deswegen ist der hier vorgestellte Anwendungsfall die gemeinsame Minimierung der CO_2-Emissionen und der zyklischen Alterung der Traktionsbatterie.
Diese multikriterielle Betriebsstrategie haben einige Forscher durch unterschiedliche Ansätze untersucht. In [2] werden Randbedingungen verändert, z.B. wird die Stromgröße eng eingeschränkt, um die Batteriealterung zu reduzieren. In [3] wird ein ähnliches Prinzip in einer heuristischen Betriebsstrategie umgesetzt, wobei die Randbedingungen durch genetische Algorithmen optimiert sind. Damit

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

werden der Verbrennungsmotor und die elektrische Maschine (EM) immer zugunsten, sowohl der CO_2-Emissionen, als auch der Lebensdauer von der Traktionsbatterie betrieben. Im Vergleich zur Veränderung der Randbedingungen haben andere Untersuchungen die zyklische Alterung direkt als ein Optimierungsziel einer Online-Betriebsstrategie betrachtet. In [4] wird ein empirisches Modell für Batteriealterung aufgebaut, das einen linearen Zusammenhang zwischen der zyklischen Alterung und dem Amperestunden-Durchsatz beschreibt. Mit dieser Annahme wird eine nicht kausale multikriterielle Betriebsstrategie auf Basis von Pontryagin's Minimum Principle (PMP) entwickelt. In [5] wird eine kausale Betriebsstrategie entwickelt, bei der der State-of-Health (SoH) der Traktionsbatterie als Zustandsgröße definiert wird. Die oben genannten Forschungen haben bereits nachgewiesen, dass die Betriebsstrategie nicht nur die CO_2-Emissionen, sondern auch die zyklische Alterung der Traktionsbatterie stark beeinflussen kann. In den oben erwähnten Veröffentlichungen wird die Methode Dynamic Programming (DP) nicht angewendet. Zudem wird die Aufteilung der Bremskraft zwischen Reibbremse und elektrischem Antrieb (E-Antrieb) nicht berücksichtigt. Diese beiden Lücken werden in diesem Artikel geschlossen.

Im Folgenden werden ein Hybrid-Fahrzeugmodell und ein empirisches Batteriealterungsmodell vorgestellt. Auf dieser Basis wird eine multikriterielle Betriebsstrategie entwickelt. Im Anschluss werden die PARETO-Fronten zwischen den CO_2-Emissionen und der zyklischen Batteirialterung analysiert.

2. Hybrid-Fahrzeugmodell

Das Simulationsmodell bildet ein P2 Hybrid Fahrzeug (siehe Abblidung 1) ab. Der Antriebsstrang besteht aus einem 8-Gang-Automatikgetriebe, einem 38 kW E-Antrieb, einer 1,7 kWh Lithium-Ionen Batterie und einem 6-Zylinder Benzinmotor mit 3 Liter Hubraum. Tabelle 1 zeigt die relevanten Parameter des Fahrzeugs.

Wie in Abblidung 2 zu sehen, gehen die Größen Geschwindigkeit v, Beschleunigung a und Steigung der Fahrstrecke γ als Eingangsgrößen in die Simulation ein. Durch die Blöcke Fahrzeugdynamik, Energiemanagement Modul, Bremse, Getriebe, Verbrennungsmotor, E-Antrieb und Traktionsbatterie ergeben sich der Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors und die SoH-Veränderung der Traktionsbatterie. Nach der Simulation werden der Kraftstoffverbrauch und die SoH-Veränderung auf den CO_2-Ausstoß und die Betriebsstunden der Traktionsbatterie umgerechnet.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

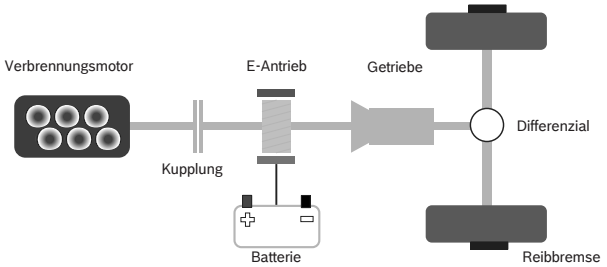


Abbildung 1: P2 Hybrid-Fahrzeug

Tabelle 1: Übersicht der Fahrzeug-Parameter

Parameter	Symbol	Wert
Radradius	r_{wh}	0,454 m
Fahrzeugmasse	m	2030 kg
Stirnfläche	A_f	2,33 m^2
Luftwiderstandsbeiwert	c_d	$0,29$
geschwindigkeitsunabhängiger Rollwiderstandsbeiwert	c_{r0}	0,01
geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandsbeiwert	c_{r1}	0
Trägheitsmoment aller Räder	θ_{wh}	4,4 $kg \cdot m^2$
Achsübersetzungsverhältnis	i_{fd}	$3,273$
Getriebeübersetzungsverhältnis	i_{vec}	$[4,92\ 2,81\ 1,84\ 1,43\ 1,21\ 1\ 0,83\ 0,69]$
minimale Motordrehzahl	ω_{idle}	83,78 rad/s
Leistungsbedarf des Bordnetzes	P_{aux}	600 W
Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers	$\eta_{dc/dc}$	$0,9291$
nominale Kapazität der Traktionsbatterie	C_{nom}	5,54 Ah
maximaler SoC	SoC_{max}	$0,65$
minimaler SoC	SoC_{min}	$0,33$

2.1 Fahrzeugdynamik

Bei dem Block Fahrzeugdynamik wird das benötigte Drehmoment am Rad T_{wh}, sowie die Drehzahl ω_{wh} und die Winkelbeschleunigung $\dot{\omega}_{wh}$ aus Geschwindigkeit v, Beschleunigung a und Streckensteigung γ berechnet. Dazu werden zuerst Beschleunigungswiderstand F_i, Luftwiderstand F_a,

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

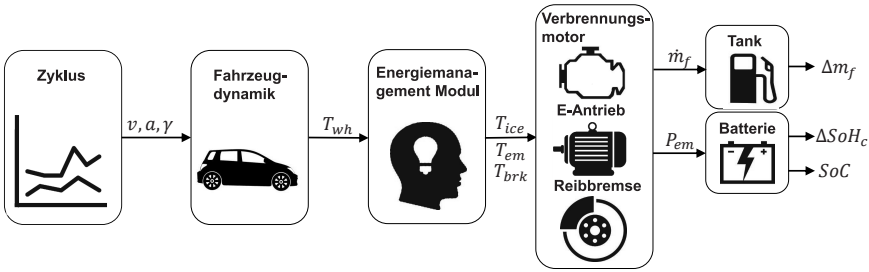


Abbildung 2: Signalfluss im Simulationsmodell

Rollwiderstand F_r und Steigungswiderstand F_g berechnet.

$$F_i(t) = m \cdot a(t) \tag{1}$$

$$F_a(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot c_d \cdot v(t)^2 \tag{2}$$

$$F_r(t) = m \cdot g \cdot cos(\gamma(t)) \cdot (c_{r0} + c_{r1} \cdot v(t)) \tag{3}$$

$$F_g(t) = m \cdot g \cdot sin(\gamma(t)) \tag{4}$$

In diesem Zusammenhang beschreibt ρ_a die Luftdichte und g ist die Erdbeschleunigung. Unter Berücksichtigung der Trägheitsmomente aller Räder wird danach das Drehmoment am Rad T_{wh} berechnet.

$$T_{wh}(t) = r_{wh} \cdot (F_i(t) + F_a(t) + F_r(t) + F_g(t)) + \theta_{wh} \cdot \frac{a(t)}{r_{wh}} \tag{5}$$

$$\omega_{wh}(t) = \frac{v(t)}{r_{wh}} \tag{6}$$

$$\dot{\omega}_{wh}(t) = \frac{a(t)}{r_{wh}} \tag{7}$$

2.2 Reibbremse

Das Bremssystem wird nur bei der Verzögerung aktiviert. Da das Bremsmoment T_{brk} über die Rekuperationsenergie entscheidet und damit die Batteriealterung beeinflusst, ist die Variable auch ein Ausgangssignal des Energiemanagement-Moduls. Das Bremsmoment T_{brk} darf nicht positiv sein.

$$T_{brk}(t) \leq 0 \tag{8}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2.3 Getriebe

Im Subsystem Getriebe ergeben sich die Drehzahl ω_{gb}, die Winkelbeschleunigung $\dot{\omega}_{gb}$ und das Drehmoment T_{gb} auf der Antriebsseite aus dem entsprechenden Übersetzungsverhältnis i_{gb} des eingelegten Gangs k_{gb}. Die Gesamtübersetzung i_{gb} wird durch das Produkt von Getriebeübersetzung i_{vec} und Achsübersetzung i_{fd} gebildet.

$$T_{gb}(t) = \frac{T_{wh}(t) + T_{brk}(t)}{i_{gb}(k_{gb}(t))} + T_{gb,loss}(t) \quad (9)$$

$$\omega_{gb}(t) = i_{gb}(k_{gb}(t)) \cdot w_{wh}(t) \quad (10)$$

$$\dot{\omega}_{gb}(t) = i_{gb}(k_{gb}(t)) \cdot \dot{\omega}_{wh}(t) \quad (11)$$

Dabei bestehen die Getriebeverluste $T_{gb,loss}$ aus Reibverlusten, Pumpenverlusten und Schaltungsverlusten. Die ersten beiden genannten Verluste sind abhängig von der Getriebedrehzahl. Die Schaltungsverlusten werden anhand von Messdaten modelliert und berücksichtigen die Fälle Antrieb und Verzögerung.

2.4 Verbrennungsmotor

Das Drehmoment des Verbrennungsmotors T_{ice} wird im Energiemanagement Modul berechnet. Das Subsystem bildet einen vereinfachten, stationären Verbrennungsmotor ab. Deshalb wird angenommen, dass keine Verzögerung zwischen dem Momentenwunsch und dem bereitgestellten Momenten des Verbrennungsmotors gegeben ist. In diesem Subsystem werden zunächst die Drehzahl ω_{ice} und die Winkelbeschleunigung $\dot{\omega}_{ice}$ des Verbrennungsmotors berechnet. Danach wird hauptsächlich der Kraftstoffverbrauch, bzw. Kraftstoffmassenstrom $\dot{m}_f$ aus dem stationären Kraftstoffverbrauch-Kennfeld durch lineare Interpolation ermittelt (siehe Abbildung 3).

$$\omega_{ice}(t) = \omega_{gb}(t) \quad (12)$$

$$\dot{\omega}_{ice}(t) = \dot{\omega}_{gb}(t) \quad (13)$$

$$\dot{m}_f(t) = f(T_{ice}(t), \omega_{ice}(t)) \quad (14)$$

Drehzahl und Drehmoment liegen innerhalb des zulässigen Bereichs, wenn der Verbrennungsmotor

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

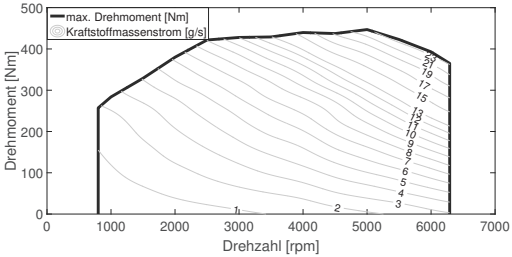


Abbildung 3: Verbrauchskennfeld des Verbrennungsmotors

in Betrieb ist. Das Schleppmoment des Verbrennungsmotors ist vernachlässigt.

$$\omega_{ice,min} \leq \omega_{ice}(t) \leq \omega_{ice,max} \tag{15}$$

$$0 \leq T_{ice}(t) \leq T_{ice,max}(\omega_{ice}(t)) \tag{16}$$

$T_{ice,max}$ beschreibt das maximale Drehmoment in Abhängigkeit der Motordrehzahl vom Verbrennungsmotor.

2.5 E-Antrieb

Analog zum Verbrennungsmotor wird der Momentenbedarf des E-Antriebes T_{em} ebenfalls im Energiemanagement Modul berechnet. Da der E-Antrieb direkt mit dem Getriebeeingang verbunden ist, entspricht die Drehzahl des E-Antriebes ω_{em} der Drehzahl am Eingang des Getriebes. Dann wird die von dem E-Antrieb aufzubringende elektrische Leistung P_{em} in Abhängigkeit von ω_{em} und T_{em} berechnet (siehe Abbildung 4).

$$\omega_{em}(t) = \omega_{gb}(t) \tag{17}$$

$$P_{em}(t) = f(T_{em}(t), \omega_{em}(t)) \tag{18}$$

Der Betriebsbereich des E-Antriebs ist eingeschränkt. $T_{em,min}$ und $T_{em,max}$ sind die der aktuellen Drehzahl entsprechenden minimalen und maximalen Momente des E-Antriebs.

$$0 \leq \omega_{em}(t) \leq \omega_{em,max} \tag{19}$$

$$T_{em,min}(\omega_{em}(t)) \leq T_{em}(t) \leq T_{em,max}(\omega_{em}(t)) \tag{20}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

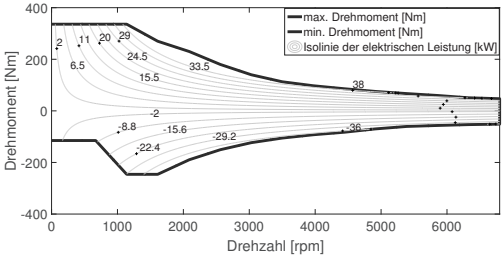


Abbildung 4: Kennfeld des E-Antriebs

2.6 Bordnetz und Batterie

Das Subsystem „Bordnetz“ beinhaltet das 12V-Bordnetz, in dem als Leistungsaufwand P_{aux} eine konstante Leistung angenommen und mit einem konstanten Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers $\eta_{dc/dc}$ umgerechnet wird. Die Summe des Energiebedarfs aus 12V-Bordnetz und E-Antrieb bildet die Eingangsgröße der Traktionsbatterie P_{batt}.

$$P_{batt}(t) = P_{em}(t) + \frac{P_{aux}}{\eta_{dc/dc}} \tag{21}$$

Die Traktionsbatterie wird als einfaches Innenwiderstandsmodell aufgebaut, welches die dynamischen elektrochemischen Effekte vernachlässigt. Dabei werden der benötigte Strom I_{batt} und der Ladezustand SoC berechnet.

$$I_{batt}(t) = \frac{U_{oc}(SoC(t)) - \sqrt{U_{oc}(SoC(t))^2 - 4 \cdot R_i(SoC(t)) \cdot P_{batt}(t)}}{2 \cdot R_i(SoC(t))} \tag{22}$$

$$\dot{SoC}(t) = -\frac{I_{batt}(t)}{C_{nom}} \tag{23}$$

Dabei sind die Leerlaufspannung U_{oc} und der Innenwiderstand R_i abhängig vom aktuellen SoC. Die beiden Ausgangssignale I_{batt} und SoC sind begrenzt. Die obere Grenze $I_{batt,max}$ und untere Grenze $I_{batt,min}$ hängen vom aktuellen SoC ab.

$$I_{batt,min}(SoC(t)) \leq I_{batt}(t) \leq I_{batt,max}(SoC(t)) \tag{24}$$

$$SoC_{min} \leq SoC(t) \leq SoC_{max} \tag{25}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2.7 Batteriealterungsmodell

Im Allgemeinen versteht man unter Batteriealterung die Abnahme der verfügbaren effektiven Energie in der Traktionsbatterie mit der Zeit und der Benutzung. Im Detail betrachtet bezieht sich der Begriff auf den Kapazitätsverlust und die Leistungsreduktion der Traktionsbatterie. Es gibt verschiedene Erklärungen für die Alterungsmechanismen der Traktionsbatterie, z.B. die Bildung und das Wachstum einer Schicht zwischen Anode und Elektrolyt (SEI, solid electrolyte interface), die Ablagerung von Lithium an der Anode, der Abbau des Bindemittels, die Korrosion des Stromabnehmers usw. [6]. Die Batteriealterung lässt sich durch den State-of-Health (SoH) beschreiben. Zur Beschreibung des SoH stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Die Leistungsreduktion wird durch die folgende Formel beschrieben [7]:

$$SoH_{Ri}(t) = \frac{R_{i,EoL} - R_{i,act}(t)}{R_{i,EoL} - R_{i,new}} \cdot 100\% \tag{26}$$

SoH_{Ri} bezeichnet die auf Leistungsreduktion bezogene Batteriealterung. Dabei ist $R_{i,EoL}$ der Innenwiderstand der Traktionsbatterie am „End of Life“(EoL). $R_{i,act}$ beschreibt den aktuellen Innenwiderstand. $R_{i,new}$ ist der Innenwiderstand einer neuen Traktionsbatterie.
SoH bezogen auf den Kapazitätsverlust wird mit dem folgenden Zusammenhang berechnet [8]:

$$SoH_C(t) = \frac{C_{act}(t)}{C_{nom}} \cdot 100\% \tag{27}$$

oder bezogen auf ein End of Life (EoL)-Kriterium [9]:

$$SoH_C(t) = \frac{5 \cdot C_{act}(t) - 4 \cdot C_{nom}}{C_{nom}} \cdot 100\% \tag{28}$$

Dabei ist SoH_c die auf Kapazitätsverlust bezogene Batteriealterung. C_{act} steht für die aktuelle Kapazität der Traktionsbatterie, während C_{nom} die nominale Kapazität einer neuen Traktionsbatterie bezeichnet.
Dave Andre [10] schlägt vor, SoH als 1 für eine neue Traktionsbatterie und SoH als 0 für eine gealterte Traktionsbatterie zu definieren. Die Gleichungen 26 und 28 erfüllen diese Anforderung. In diesem Artikel wird die Definition von SoH nach Gleichung 28 verwendet. Zudem lässt sich die Batteriealterung je nach Benutzungsrandbedingungen in zwei Arten klassifizieren: kalendarische und zyklische Alterung. Weil die Betriebsstrategie nur die zyklische Alterung direkt beeinflussen kann, wird hier ein Kapazitätsmodell für die zyklische Alterung aufgebaut.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Es gibt verschiedene Modellierungsmethoden für die Kapazitätseinschätzung:

- elektrochemische Modellierung
- Modellierung auf Basis von elektrischer Ersatzschaltung
- empirische Modellierung

Hier wird ein empirisches Modell dargestellt. Die Kapazität der Traktionsbatterie reduziert sich mit der Benutzung der Traktionsbatterie, also mit der Steigerung des Amperestunden-Durchsatzes Q (siehe Gleichung 29). Unter verschiedenen Randbedingungen ist die Reduzierungsrate unterschiedlich. Nach [8] und [11] wird die Reduzierungsrate der Kapazität von der Temperatur T, der Lade- und Entlade-C-Rate CR_{cha} und CR_{dis}, dem Lade-Hub δSoC und dem mittleren Ladezustand SoC_{mean} beeinflusst. Um den Einfluss von verschiedenen Randbedingungen auf den Kapazitätsverlust zu beschreiben, wird ein Severity-Factor ϵ für die Reduzierungsrate eingeführt. Es ergibt sich für die aktuelle Kapazität C_{act}:

$$Q(t) = \int_0^t |I_{batt}(t)| \, \mathrm{d}t \tag{29}$$

$$\epsilon = f(T, CR_{dis}, CR_{cha}, \delta SoC, SoC_{mean}) \tag{30}$$

$$C_{act}(t) = C_{nom} - \epsilon(t) \cdot Q(t)^z \tag{31}$$

Dabei ist I die Stromgröße und z der exponentielle Zusammenhang zwischen C_{act} und Q. Nach Gleichung 28 folgt SoH_C daraus:

$$SoH_C(t) = 1 - \frac{5 \cdot \epsilon(t) \cdot Q(t)^z}{C_{nom}} \tag{32}$$

Der Severity-Factor ϵ kann durch Versuchspläne für statische Belastung ermittelt werden. In [12] und [13] werden ähnliche Formeln eingesetzt, wobei z ungefähr 0,5 ist. In [14] ist z gleich 1. Es ist zu beachten, dass in [13] der Parameter ϵ für einen Fahrzyklus mit festgelegter Betriebsstrategie und unter dynamischer Belastung bestimmt wurde.

In [12] wird nachgewiesen, dass unter verschiedenen Randbedingungen unterschiedliche Amperestunden-Durchsätze bis EoL durchgesetzt werden. Das bedeutet, dass trotz des ungleichen Q der Alterungseffekt gleich ist. Um die unterschiedlichen Auswirkungen von verschiedenen Randbedingungen zu vergleichen, wird eine normierte Randbedingung eingeführt. Als normierte Randbedingung könnte die Bedingung, die häufig benutzt wird oder unter der eine Mindestanforderung an die Lebensdauer erfüllt wird, definiert werden. Gleichung 33 zeigt den Zusammenhang zwischen C_{nom} und Q_{norm} mit einer normierten Randbedingung. Q_{norm} ist der gesamte Amperestunden-Durchsatz unter der normierten Randbedigung bis EoL. Diese Formel kommt direkt aus der Definition, dass SoH_C gleich

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

null ist, wenn eine Traktionsbatterie ihren EoL erreicht hat.

$$C_{nom} = 5 \cdot \epsilon_{norm} \cdot Q_{norm}^{z} \tag{33}$$

Damit wird Gleichung 32 umformuliert:

$$SoH_C(t) = 1 - \frac{\epsilon(t) \cdot Q(t)^z}{\epsilon_{norm} \cdot Q_{norm}^{z}} \tag{34}$$

Damit wird der Acceleration-Factor AF definiert:

$$AF(t) = \frac{\epsilon(t)}{\epsilon_{norm}} \tag{35}$$

Der Acceleration-Factor AF beschreibt die beschleunigte oder verzögerte Wirkung von verschiedenen Randbedingungen im Vergleich zu einer normierten Randbedingung. Damit ergeben sich SoH_C und $\dot{SoH_C}$:

$$SoH_C(t) = 1 - AF(t) \cdot \frac{Q(t)^z}{Q_{norm}^{z}} \tag{36}$$

$$\dot{SoH_C}(t) = -\frac{AF(t)}{Q_{norm}^{z}} \cdot z \cdot Q(t)^{z-1} \cdot |I_{batt}(t)| \tag{37}$$

Dabei muss beachtet werden, dass ϵ bzw. AF nicht explizit abhängig von der Zeit sind, sondern implizit über die mit der Zeit veränderlichen Randbedingung.
Durch Umstellen von Gleichung 36 ergibt sich Q:

$$Q(t) = \frac{(1 - SoH_C(t))^{\frac{1}{z}} \cdot Q_{norm}}{AF(t)^{\frac{1}{z}}} \tag{38}$$

Infolgedessen wird Gleichung 37 umformuliert:

$$\dot{SoH_C}(t) = -\frac{z}{Q_{norm}} \cdot AF(t)^{\frac{1}{z}} \cdot (1 - SoH_C(t))^{\frac{z-1}{z}} \cdot |I_{batt}(t)| \tag{39}$$

Die in diesem Artikel dargestellte Traktionsbatterie zeigt einen approximativ linearen Zusammenhang zwischen SoH_C und Q. Unter dieser Rahmenbedingung wird ein linearer Zusammenhang zwischen SoH_C und Q während der Simulation angenommen, also $z = 1$. Damit vereinfacht sich Gleichung 39 für ein empirisches Alterungsmodell in dem Artikel zu:.

$$\dot{SoH_C}(t) = -\frac{AF(t)}{Q_{norm}} \cdot |I_{batt}(t)| \tag{40}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2.8 Energiemanagement Modul

Der Block bezieht sich auf das Steuergerät von einem Fahrzeug, wobei die Gangwahl k_{gb}, der Momentenbedarf des E-Antriebes T_{em}, der Momentenbedarf des Verbrennungsmotors T_{ice} und der Momentenbedarf der Reibbremse T_{brk} berechnet sind.

Der Gang wird nach einer heuristischen Schaltstrategie (Abbildung 5) ausgewählt, wobei die Schaltkurven für Hochschalten und Herunterschalten primär abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit v und der Gaspedalstellung p_g sind. Die Gaspedalstellung p_g wird Anhand des Radmoments und der maximalen Momente von Verbrennungsmotor und E-Antrieb berechnet. Außerdem wird angenommen, dass die Gangschaltung im Getriebe verzögerungsfrei stattfindet.

$$p_g(t) = f(T_{wh}(t), T_{ice,max}(t), T_{em,max}(t)) \tag{41}$$

$$k_{gb}(t) = f(v(t), p_g(t), k_{gb}(t-1)) \tag{42}$$

Die im nächsten Kapitel erklärten Optimierungsalgorithmen sind zuständig für den Momentenbedarf

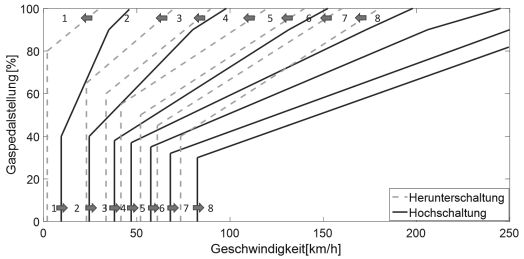


Abbildung 5: Heuristische Schaltstrategie

des E-Antriebes u_{em}. Danach werden die Momente des Verbrennungsmotors T_{ice}, des E-Antriebes T_{em} und der Reibbremse T_{brk} im Energiemanagement Modul berechnet. Dabei wird das Getriebe-Eingangsmoment T_{gb} wird auf jeden Fall gestellt. Ist T_{gb} größer als T_{em}, wird das restliche Moment vom Verbrennungsmotor bereitgestellt. Ansonsten liefert die Reibbremse den negativen Anteil.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$T_{em}(t) = u_{em}(t) \tag{43}$$

$$T_{ice}(t) = \begin{cases} T_{gb}(t) - u_{em}(t) & \text{wenn } T_{gb}(t) - u_{em}(t) \geq 0 \\ 0 & \text{wenn } T_{gb}(t) - u_{em}(t) < 0 \end{cases} \tag{44}$$

$$T_{brk}(t) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } T_{gb}(t) - u_{em}(t) \geq 0 \\ i_{gb}(k_{gb}(t)) \cdot (T_{gb}(t) - u_{em}(t)) & \text{wenn } T_{gb}(t) - u_{em}(t) < 0 \end{cases} \tag{45}$$

3. Optimierungsalgorithmen

Im folgenden Abschnitt geht es um die Theorie der verschiedenen Optimierungsalgorithmen. Zuerst werden zwei Optimierungsprobleme dargestellt. Im Anschluss daran werden die Lösungsverfahren hergeleitet und aufgezeigt, wie sie sich für die gewählte Problemformulierung eignen. Die Algorithmen laufen im Energiemanagement Modul. Die Herleitungen sind für ein allgemeines Batteriealterungsmodell gültig.

3.1 Optimierungsproblem 1: multikriterielle Betriebsstrategie ohne Strafkosten für SoC-Abweichung

Wie oben genannt, ist die multikriterielle Betriebsstrategie dafür zuständig, nach der optimalen Momentenaufteilung für die gemeinsame Minimierung von CO_2-Emissionen und zyklischer Alterung der Traktionsbatterie zu suchen. Weil die CO_2-Emissionen mit dem Kraftstoffverbrauch zusammenhängen, wird im folgenden Abschnitt der Kraftstoffverbrauch direkt als ein Optimierungsziel betrachtet. Ähnlich wie in [15] werden zwei Methoden zur Lösung des Optimierungsproblems vorgestellt.

3.1.1 Problemformulierung

Ziel der Optimierung ist die gleichzeitige Minimierung von CO_2-Emissionen und zyklischer Alterung für ein festgelegtes Fahrprofil. Der Start-SoC und End-SoC gehen als Randbedingung in die Optimierung ein. Dadurch ist die Betriebsstrategie als ein Optimierungsproblem mit festem Zeitraum und der Einschränkung vom Endzustand definiert. Das Optimierungsproblem wird folgendermaßen

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

formuliert:

$$min \quad \{J(u) = \int_{t_0}^{t_f} (\alpha \cdot \dot{m}_f(u(t)) - \beta \cdot \dot{SoH}_C(u(t)))\,\mathrm{d}t\} \tag{46}$$

$$s.t. \quad \dot{x}(t) = -\frac{I_{batt}(u(t))}{C_{nom}} \tag{47}$$

$$x(t_0) = x_0 \tag{48}$$

$$x(t_f) = x_f \tag{49}$$

$$x(t) \in X \tag{50}$$

$$u(t) \in U(t) \tag{51}$$

Dabei ist J die Funktion der Optimierungsziele. t_0 und t_f sind der Startzeitpunkt und Endzeitpunkt für den festen Zeitraum. α ist der Gewichtungsfaktor für Kraftstoffverbrauch und β ist der Gewichtungsfaktor für zyklische Alterung. Die Zustandsvariable x ist in diesem Fall der SoC. Die Stellvariable u ist das Drehmoment des E-Antriebes u_{em}. x_0 kennzeichnet den definierten Startzustand und x_f ist der angeforderte Endzustand. X ist der Zustandsraum und U ist der Raum für die Stellgrößen.

$$x(t) = \left[SoC(t)\right] \tag{52}$$

$$u(t) = \left[u_{em}(t)\right] \tag{53}$$

3.1.2 Dynamic Programming

Dynamic Programming (DP) ist ein auf dem bekannten Bellmanschen Optimalitätsprinzip [16] basierender Algorithmus. Nach diesem Prinzip wird ein sequentielles Optimierungsproblem in N gleichartige Teilprobleme zerlegt, welche nacheinander einzeln gelöst werden. Dabei werden die optimalen Kosten vom Endzustand ausgehend bis zum aktuellen Zustand durch unterschiedliche Verbindung der Einzellösung rückwärts berechnet und gespeichert. Dadurch wird der optimale Weg gefunden.
Bei diesem Verfahren müssen die Zustands- und Stellgrößen diskret sein. x_i und u_i sind die diskretisierten Zustands- und Stellgrößen. $g_k(x_i, u_i)$ sind die gemeinsamen Kosten für Kraftstoffverbrauch und zyklische Alterung bei jedem beliebigen Teilproblem k mit beliebiger Zustandsgröße x_i und Stellgröße u_i. Die Kosten werden durch das Fahrzeugmodell ermittelt. Eine beliebige Regelungsfolge ist als $\pi = \{u_0, u_1, ..., u_k, ..., u_{N-1}\}$ bezeichnet. Ein optimales Regelgesetz ist als π^o definiert. Um π^o zu finden, kann man wie folgt vorgehen [17]:
1. Kosten für Beschränkung des Endzustands berechnen:

$$\phi_{x_i,N} = g_N(x_i) \tag{54}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Schleife für Teilproblem von $N-1$ bis 0 durchführen:

2.1. Kosten für Teilproblem mit beliebiger Zustandsgröße x_i und Stellgröße u_i berechnen:

$$g_k(x_i, u_i) = \alpha \cdot \dot{m}_f(x_i(k), u_i(k)) - \beta \cdot \dot{SoH}_C(x_i(k), u_i(k)) \tag{55}$$

2.2. Optimale Kosten von k bis N berechnen und entsprechendes optimales $\pi(x_i, k)$ speichern:

$$\phi_{x_i,k} = min\{g_k(x_i, u_i) + \phi_{x_i,k+1}\} \tag{56}$$

$$\pi(x_i, k) = argmin(g_k(x_i, u_i) + \phi_{x_i,k+1}) \tag{57}$$

3. Optimales Regelgesetz π^o für Startzustand x_0 finden:

$$\pi^o = \pi(x_0, 0) \tag{58}$$

Durch DP kann die global optimale Lösung gefunden werden. Leider besteht eine Voraussetzung für den Algorithmus: Die Informationen für den ganzen Zyklus müssen bekannt sein. Damit ist der Algorithmus akausal.

3.1.3 Pontryagin's Minimum Principle

Die Methode Pontryagin's Minimum Principle (PMP) basiert auf der Variationsrechnung [18]. Dabei wird eine Hamilton-Funktion eingeführt. Für ein allgemeines Optimierungsproblem [19]:

$$min \quad \{J(u) = K(t_f) + \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t), t)\,\mathrm{d}t\} \tag{59}$$

$$s.t. \quad \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \tag{60}$$

$$x(t_0) = x_0 \tag{61}$$

$$x(t_f) = x_f \tag{62}$$

wird die Hamilton Funktion wie folgt definiert:

$$H(x(t), u(t), \lambda(t), t) = L(x(t), u(t), t) + \lambda^T(t) f(x(t), u(t), t) \tag{63}$$

Dabei ist K ein Strafkostenterm für den Endzustand. Das Symbol L ist eine Funktion für die integralen Kosten. λ ist der Lagrange-Multiplikator, womit die adjungierten Zustände beschrieben werden. Die Aussagen des PMP sind:

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

a) Die optimale Lösung muss die folgenden Randbedingungen erfüllen:

$$\dot{x}^o(t) = \nabla_\lambda H_{|o} = f(x^o(t), u^o(t), t) \tag{64}$$

$$x^o(t_0) = x_0 \tag{65}$$

$$x^o(t_f) = x_f \tag{66}$$

$$\dot{\lambda}^o(t) = -\nabla_x H_{|o} = -\nabla_x L(x^o(t), u^o(t), t) - \left[\frac{\partial f}{\partial x}(x^o(t), u^o(t), t)\right]^T \lambda^o(t) \tag{67}$$

b) Die Hamilton Funktion mit optimaler Stellgröße u^o ist global minimal für den Zeitraum $[t_0, t_f]$:

$$H(x^o(t), u^o(t), \lambda^o(t), t) \leq H(x^o(t), u(t), \lambda^o(t), t) \tag{68}$$

$$u^o = argmin(H(x^o(t), u(t), \lambda^o(t), t)) \tag{69}$$

Durch Einführung des Lagrange-Multiplikators in der Hamilton-Funktion wird sich von einem globalen Optimierungsproblem in ein lokales Optimierungsproblem umwandeln, wobei die Stellgröße lediglich anhand den aktuellen verfügbaren Zustandsdaten in Echtzeit optimiert werden kann. Dieser Vorteil wird als Onlinefähigkeit genannt. Dennoch führt nur der optimale Lagrange-Multiplikator zur optimalen Stellgrößen. Die Schwierigkeit des Verfahrens liegt in der Suche nach dem optimalen Lagrange-Multiplikator.

Die Anwendung des PMP auf das Optimierungsproblem (siehe Gleichungen 46 bis 51) führt zu folgender Hamilton-Funktion:

$$H(t) = \alpha \cdot \dot{m_f}(t) - \beta \cdot \dot{SoH_C}(t) - \lambda(t) \cdot \frac{I_{batt}(t)}{C_{nom}} \tag{70}$$

mit den Voraussetzungen der Optimalität

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H(t)}{\partial x(t)} = -\alpha \cdot \frac{\partial \dot{m_f}(t)}{\partial SoC(t)} + \beta \cdot \frac{\partial \dot{SoH_C}(t)}{\partial SoC(t)} + \frac{\lambda(t)}{C_{nom}} \cdot \frac{\partial I_{batt}(t)}{\partial SoC(t)} \tag{71}$$

Gleichung 14 zeigt es, dass $\dot{m_f}$ nicht von dem Zustand SoC abhängt. Ähnlich wie [15] wird angenommen, dass I_{batt} innerhalb eines gewissen SoC-Bereichs auch unabhängig vom SoC ist. $AF(t)$ in der Gleichung für $\dot{SoH_C}$ (Gleichung 39) ist nicht abhängig von dem aktuellen SoC, sondern von dem Betriebsbereich der Traktionsbatterie, siehe dazu Gleichungen 30 und 35. Deshalb ist $\dot{\lambda}$ null, also

$$\lambda(t) = \lambda_0 \tag{72}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Durch die Einführung der Berechnungsformel für $\dot{SoH_C}$ (Gleichung 39) ist die Struktur der multikriteriellen Betriebsstrategie damit wie folgt gegeben:

$$\begin{aligned} H(t) &= \alpha \cdot \dot{m_f}(t) + \frac{\beta \cdot z}{Q_{norm}} \cdot AF(t)^{\frac{1}{z}} \cdot (1 - SoH_C(t))^{\frac{z-1}{z}} \cdot |I_{batt}(t)| - \lambda_0 \cdot \frac{I_{batt}(t)}{C_{nom}} \\ &= \alpha^* \cdot P_f(t) + \Theta(t) \cdot AF(t)^{\frac{1}{z}} \cdot |P_{el}(t)| + s_0 \cdot P_{el}(t) \end{aligned} \tag{73}$$

mit

$$\alpha^* = \frac{\alpha}{H_l} \tag{74}$$

$$\Theta(t) = \frac{\beta \cdot z \cdot (1 - SoH_C(t))^{\frac{z-1}{z}}}{U_{oc} \cdot Q_{norm}} \tag{75}$$

$$s_0 = -\frac{\lambda_0}{U_{oc} \cdot C_{nom}} \tag{76}$$

Die optimale Stellgröße u^o wird nach Gleichung 69 berechnet. Der optimale Äquivalenzfaktor s_o wird in diesem Artikel mit Hilfe eines Schießverfahrens gefunden.

Im Folgenden wird dieser Ansatz Multi-Objective Equivalent Consumption Minimization Strategy (MO-ECMS) genannt.

3.2 Optimierungsproblem 2: multikriterielle Betriebsstrategie mit Strafkosten für SoC-Abweichung

Den optimalen Äquivalenzfaktor s_0 kann man nicht vorhersagen, wenn die globalen Informationen nicht zur Verfügung stehen. Um die Robustheit der Betriebsstrategie zu erhöhen, wird hier ein neues Optimierungsproblem vorgestellt. Dabei werden Strafkosten für eine SoC-Abweichung von einem Referenzwert SoC_{ref} eingeführt. Das neue Optimierungsproblem wird auf Basis von PMP gelöst.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3.2.1 Problemformulierung und die entsprechende Hamilton Funktion

Das neue Optimierungsproblem ist:

$$min \quad \{J_p(u) = \int_{t_0}^{t_f} (\alpha \cdot \dot{m_f}(u(t)) - \beta \cdot \dot{SoH_C}(u(t)) + \zeta \cdot (SoC_{ref} - x(t))^2)\,\mathrm{d}t\} \tag{77}$$

$$s.t. \quad \dot{x}(t) = -\frac{I_{batt}(u(t))}{C_{nom}} \tag{78}$$

$$x(t_0) = x_0 \tag{79}$$

$$x(t_f) = x_f \tag{80}$$

$$x(t) \in X \tag{81}$$

$$u(t) \in U(t) \tag{82}$$

wobei ζ der Gewichtungsfaktor für die SoC-Abweichung von einem Referenzwert ist. SoC_{ref} ist der Referenzwert. Da es um ein Hybridfahrzeug geht, wird der Referenzwert als 0,5 definiert. Die entsprechende Hamilton Funktion ist:

$$\begin{aligned} H_p(t) &= \alpha \cdot \dot{m_f}(t) - \beta \cdot \dot{SoH_C}(t) + \zeta \cdot (SoC_{ref} - x(t))^2 - \lambda_p(t) \cdot \frac{I_{batt}(t)}{C_{nom}} \\ &= \alpha^* \cdot P_f(t) + \Theta(t) \cdot AF(t)^{\frac{1}{z}} \cdot |P_{el}(t)| + s_p(t) \cdot P_{el}(t) + \zeta \cdot (\Delta SoC(t))^2 \end{aligned} \tag{83}$$

mit

$$\alpha^* = \frac{\alpha}{H_l} \tag{84}$$

$$\Theta(t) = \frac{\beta \cdot z \cdot (1 - SoH_C(t))^{\frac{z-1}{z}}}{U_{oc} \cdot Q_{norm}} \tag{85}$$

$$s_p(t) = -\frac{\lambda_p(t)}{U_{oc} \cdot C_{nom}} \tag{86}$$

$$\Delta SoC(t) = SoC_{ref} - x(t) \tag{87}$$

Nach Gleichung 69 wird die optimale Stellgröße u^o berechnet. Der optimale Äquivalenzfaktor s_p, der bei diesem Optimierungsproblem mit Strafkosten für eine SoC-Abweichung ist, wird in den folgenden Abschnitten durch Hamilton-Jacobi-Bellman Theorem (HJB) gelöst. Diese Methode ist die Basis einer kausalen multikriteriellen Betriebsstrategie und wird im Folgenden mit cMO-ECMS (causal Multi-Objective Equivalent Consumption Minimization Strategy) abgekürzt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3.2.2 Hamilton-Jacobi-Bellman Theorem

In [19] wird gezeigt, dass ein Zusammenhang zwischen der cost-to-go-function $\Phi(x,t)$ bei DP und dem optimalen Lagrange-Multiplikator bei PMP besteht.

$$\lambda_p(t) = \frac{\partial \Phi_p(x(t),t)}{\partial x(t)} \tag{88}$$

Leider kann $\Phi_p(x(t),t)$ nur mittels DP bestimmt werden. Wenn keine DP-Lösung zur Verfügung steht, wird hier ein Lösungsverfahren eines suboptimalen Ergebnisses angenommen. Das Lösungsverfahren ist wie folgt, zuerst vom aktuellen Zustand $x(t)$ auf den optimalen Zustand SoC_{ref} in einem festgelegten Zeitraum Δt zurückzugehen und danach der optimalen Trajektorie zu folgen, wenn es eine Zustandsabweichung gibt. Unter dieser Annahme kann $\Phi_p(x(t),t)$ wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned}\Phi_p(x(t),t) &= \int_t^{t+\Delta t} (\alpha \cdot \dot{m}_f(u(t)) - \beta \cdot \dot{SoH}_C(u(t)) + \zeta \cdot (SoC_{ref} - x(t))^2)\,\mathrm{d}t \\ &\quad + \Phi_p(x^o(t+\Delta t), t+\Delta t)\end{aligned} \tag{89}$$

Dabei ist $\Phi_p(x^o(t+\Delta t), t+\Delta t)$ unabhängig von $x(t)$.
Die einzeln Terme aus Gleichung 89 werden in den Gleichungen 90, 91 und 97 berechnet:

$$\int_t^{t+\Delta t} (\alpha \cdot \dot{m}_f(u(t)))\,\mathrm{d}t = \frac{\alpha \cdot (SoC_{ref} - x(t)) \cdot C_{nom} \cdot U_{oc}}{\eta_p \cdot H_l} \tag{90}$$

Gleichung 90 basiert auf einer Energiebilanz, wobei ein konstanter Umwandlungswirkungsgrad η_p zwischen chemischer und elektrischer Energie angenommen wird. Diese Annahme ist im Hinblick darauf getroffen, dass die optimale Momentenaufteilung nur zu geringen Abweichungen des Umwandlungswirkungsgrades η_p führt.

$$\int_t^{t+\Delta t} (-\beta \cdot \dot{SoH}_C(u(t)))\,\mathrm{d}t = \frac{\beta \cdot C_{nom}}{Q_{norm}} \cdot AF_p(t)^{\frac{1}{z}} \cdot z \cdot (1 - SoH_C(t))^{\frac{z-1}{z}} \cdot |SoC_{ref} - x(t)| \tag{91}$$

Der Parameter $AF_p(t)$ in Gleichung 91 geht aus der Annahme einer konstanten Stromgröße hervor. Die Berechnung von AF_p nach Gleichung 30 und 35:

$$AF_p(t) = \frac{\epsilon(T, CR_{dis}(t), CR_{cha}(t), \delta SoC(t), SoC_{mean}(t))}{\epsilon_{norm}} \tag{92}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

mit

$$CR_{dis}(t) = CR_{cha}(t) = \frac{|SoC_{ref} - x(t)|}{\Delta t} \tag{93}$$

$$\delta SoC(t) = |SoC_{ref} - x(t)| \tag{94}$$

$$SoC_{mean}(t) = \frac{SoC_{ref} + x(t)}{2} \tag{95}$$

Bei die Berechnung der Strafkosten für die SoC-Abweichung wird ein linearer SoC-Verlauf zwischen dem aktuellen Zustand $x(t)$ und SoC_{ref} für den Zeitraum Δt angenommen. Das heißt:

$$x(\tau) \quad = \quad x(t) + \frac{SoC_{ref} - x(t)}{\Delta t} \cdot (\tau - t) \qquad \text{für } t \leq \tau \leq t + \Delta t \tag{96}$$

$$\int_t^{t+\Delta t} (\zeta \cdot (SoC_{ref} - x(t))^2)\,\mathrm{d}t = \frac{\zeta \cdot \Delta t \cdot (SoC_{ref} - x(t))^2}{3} \tag{97}$$

Nach Gleichung 88 wird $\lambda_p(t)$ weiter berechnet:

$$\begin{aligned} \lambda_p(t) \quad = \quad & -\frac{\alpha \cdot C_{nom} \cdot U_{oc}}{\eta_p \cdot H_l} - \frac{2 \cdot \zeta \cdot \Delta t \cdot (SoC_{ref} - x(t))}{3} \\ & -\frac{\beta \cdot C_{nom}}{Q_{norm}} \cdot AF_p(t)^{\frac{1}{z}} \cdot z \cdot (1 - SoH_C(t))^{\frac{z-1}{z}} \cdot sign(SoC_{ref} - x(t)) \end{aligned} \tag{98}$$

mit

$$sign(SoC_{ref} - x(t)) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } SoC_{ref} - x(t) > 0 \\ 0 & \text{wenn } SoC_{ref} - x(t) = 0 \\ -1 & \text{wenn } SoC_{ref} - x(t) < 0 \end{cases} \tag{99}$$

Daraus folgt für s_p:

$$s_p(t) \quad = \quad s_{p0}(t) + K_p \cdot \Delta SoC(t) \tag{100}$$

mit

$$s_{p0}(t) = \frac{\alpha}{H_l \cdot \eta_p} + \frac{\beta \cdot AF_p(t)^{\frac{1}{z}} \cdot z \cdot (1 - SoH_C(t))^{\frac{z-1}{z}} \cdot sign(SoC_{ref} - x(t))}{U_{oc} \cdot Q_{norm}} \tag{101}$$

$$K_p = \frac{2 \cdot \zeta \cdot \Delta t}{3 \cdot U_{oc} \cdot C_{nom}} \tag{102}$$

$$\Delta SoC(t) = SoC_{ref} - x(t) \tag{103}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 2: Übersicht der Kennwerte der Zyklen

Kennwerte (Einheit)	NEDC	WLTC	SLT
Streckenlänge (km)	10,9	23,1	61,8
Zeitdauer (h)	0,33	0,50	1,13
relative positive Beschleunigung (m/s^2)	0,117	0,162	0,114
Steigungsprofil	Nein	Nein	Ja
durchschnittliche Steigung (°)	0	0	0,1

4. Simulationsergebnisse und Analyse

In diesem Abschnitt werden zuerst die Zyklen und die Postprocessing-Umrechnung kurz erklärt und dann PARETO-Fronten für verschiedene Algorithmen gezeigt. Anhand dieser PARETO-Fronten werden die unterschiedlichen Optimierungsalgorithmen und Zyklen miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass durch die multikriterielle Betriebsstrategie die zyklische Alterung der Traktionsbatterie verbessert werden kann, während sich die CO_2-Emissionen erhöhen. Außerdem verliert die cMO-ECMS wegen der Einführung von Strafkosten für eine SoC-Abweichung etwas an Potential für die CO_2-Emissionen im Vergleich zur MO-ECMS. Allerdings dadurch wird die Robustheit der Betriebsstrategie erhöht.

4.1 Zyklen

Abbildung 6 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf im New European Driving Cycle (NEDC), Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle (WLTC) und Stuttgart-Zyklus (SLT). Im Vergleich zum NEDC sind sowohl der WLTC, als auch der SLT deutlich dynamischer. Der entscheidende Unterschied zwischen dem WLTC und dem SLT besteht im Steigungsprofil. Tabelle 2 listet die Kennwerte der Zyklen auf.

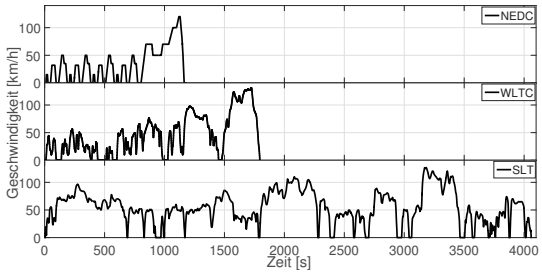


Abbildung 6: Geschwindigkeitsverlauf der Zyklen

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4.2 Postprocessing-Umrechnung

Während der Simulation werden der Kraftstoffmassenstrom $\dot{m}_f$ und die Änderungsrate der Batteriealterung $\dot{SoH}_C$ berechnet. Nach der Simulation liegen der gesamte Kraftverbrauch Δm_f und die zyklische Batteriealterung ΔSoH_c für einen Zyklus vor. In Gleichung 104 werden die CO_2-Emissionen m_{CO_2} vom Δm_f umgerechnet. Dabei ist D_c die Länge des Zyklus und k ein konstanter Umrechnungsfaktor.

$$m_{CO_2} = k \cdot \frac{\Delta m_f}{D_c} \tag{104}$$

Zudem wird die zyklische Alterung ΔSoH_c für einen Zyklus auf Betriebsstunden T_{batt} der Traktionsbatterie umgerechnet. Dabei ist T_c die Zeitdauer des Zyklus. Der SoH_c für eine neue und gealterte Traktionsbatterie liegt im Bereich von 1 bis 0.

$$T_{batt} = \frac{T_c}{\Delta SoH_c} \tag{105}$$

Um den Verlängerungseffekt deutlich zu zeigen, werden danach die Betriebsstunden der Traktionsbatterie T_{batt} aus der multikriteriellen Betriebsstrategie mit den Betriebsstunden der Traktionsbatterie $T_{batt,ECMS}$ aus der originalen ECMS (Θ=0 bei MO-ECMS) verglichen (siehe 106). Hier ist $\overline{T_{batt}}$ der Verlängerungsfaktor der Lebensdauer der Traktionsbatterie.

$$\overline{T_{batt}} = \frac{T_{batt}}{T_{batt,ECMS}} \tag{106}$$

4.3 PARETO-Fronten von DP und MO-ECMS

Für den Gewichtungsfaktor des Kraftstoffverbrauchs α^* in Gleichung 73 wird immer 1 ausgewählt, während für den Gewichtungsfaktor der Batteriealterung Θ verschiedene Werte von 0 bis 5 simuliert werden. Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Die senkrechte durchgezogene Linie zeigt die CO_2-Emissionen eines konventionellen Fahrzeugs für den jeweiligen Zyklus. Die runden Punkte kennzeichnen die Ergebnisse von MO-ECMS, jeweils für einen Verlängerungsfaktor von 1 und 2. Es wäre auch repräsentativ, den Punkt aus Sicht von der Summe aller Kosten für Benzin und den Umtausch der Traktionsbatterie auszuwählen [3].

In Abbildung 7 erzielt die MO-ECMS, insbesondere im WLTC und SLT, annähernd das global optimale Ergebnis von DP. Aufgrund der Onlinefähigkeit der PMP wird die MO-ECMS bevorzugt, um die prädiktive multikriterielle Betriebsstrategie weiter zu entwickeln.

Um einen vernünftigen Kompromiss zwischen CO_2-Emissionen und Lebensdauer der Traktionsbat-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

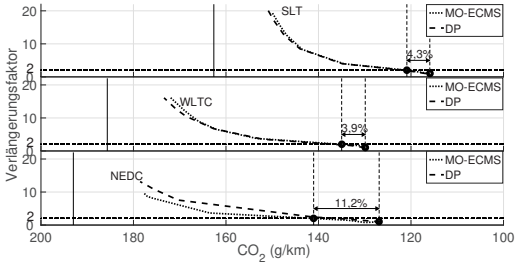


Abbildung 7: PARETO-Fronten von DP und MO-ECMS für die untersuchten Zyklen

terie zu bekommen, wird das Ergebnis mit verdoppelter Lebensdauer analysiert. Der Bezugspunkt ist das Ergebnis der originalen ECMS. Für den SLT erzeugt eine verdoppelte Lebensdauer 4,3% mehr CO_2-Emissionen. Im WLTC führt die Verdoppelung der Lebensdauer zu 3,9% mehr CO_2-Emissionen, im NEDC zu 11,2% mehr CO_2-Emissionen.

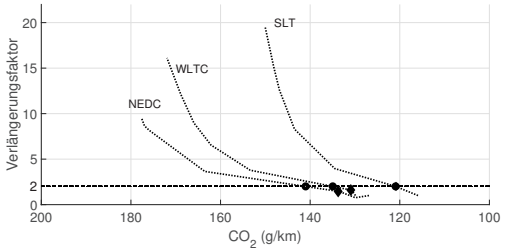


Abbildung 8: PARETO-Fronten von MO-ECMS für die untersuchten Zyklen

Da in dem Simulationsmodell die Reibbremskraft einstellbar ist, lohnt es sich, die Bremsmomentenaufteilung mit verschiedenen Gewichtungsfaktoren für die Batteriealterung Θ in Gleichung 73 zu analysieren. Im SLT-Zyklus und im WLTC fängt die multikriterielle Betriebsstrategie mit Θ ab 1,5 an, die Bremskraft zu beeinflussen. Wenn Θ nicht größer als 1,5 ist, führt die multikriterielle Betriebsstrategie MO-ECMS zu einer unterschiedlichen Verteilung von Lastpunktanhebung, rein verbrennungsmotorischem Fahren und rein elektrischem Fahren in der Antriebsphase. Steigt Θ weiter an, verändert sich zunächst der Anteil der Rekuperation mit Reibbremsen. Schließlich findet reines Reibbremse ohne Rekuperation statt. Im NEDC hat Θ ab Werten von 2 einen großen Einfluss auf die Bremsmomentenaufteilung. Die rautenförmigen Punkte in Abbildung 8 markieren den Übergang, ab dem die multikriterielle Betriebsstrategie zusätzlich zur Antriebsmomentenaufteilung auch die Bremsmomentenaufteilung beeinflusst. Für eine Verdoppelung der Batterielebensdauer im

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

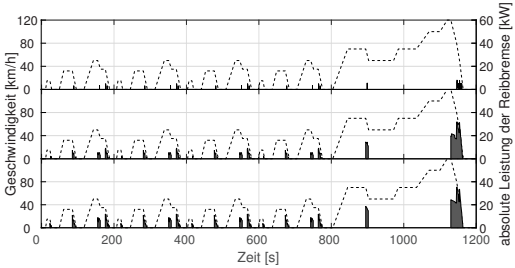


Abbildung 9: absolute Leistung der Reibbremse bei MO-ECMS im NEDC

NEDC und WLTC wird die Bremsmomentenaufteilung mit optimiert, im SLT ist das nicht notwendig. Abbildung 9 zeigt den Leistungsverlauf der Reibbremse im NEDC bei verschiedenen Gewichtungsfaktoren der Batteriealterung Θ. Mit Erhöhung von Θ steigen nicht nur die absolute Größe, sondern auch die Zeitdauer der Reibbremsleistung an.

4.4 PARETO-Fronten von MO-ECMS und cMO-ECMS

Die Methode cMO-ECMS hat die Strafkosten für SoC-Abweichungen von einem konstanten Referenz-SoC im Vergleich zur MO-ECMS eingeführt. Das Symbol ζ ist der Gewichtungsfaktor für die Strafkosten. Wenn ζ Null ist, dann ist cMO-ECMS identisch mit MO-ECMS. Hier werden die Ergebnisse mit dem selben Gewichtungsfaktor für Batteriealterung $\Theta = 1,5$ im SLT als Beispiel gezeigt, um den Einfluss der Strafkosten vorzustellen. Wie in Abbildung 10 zu sehen, führen die „teueren“ Strafkosten für eine SoC-Abweichung bei dem selben Gewichtungsfaktor für Batteriealterung dazu, dass die CO_2-Emissionen um 29,25% ansteigen, während die Lebensdauer der Traktionsbatterie um den Faktor 8,7 erhöht wird. Durch die Einführung der Strafkosten für eine SoC-Abweichung erhöhen sich sowohl die Lebensdauer der Traktionsbatterie als auch die CO_2-Emissionen gegenüber der MO-ECMS.

In Abbildung 11 wird die Robustheit der verschiedenen Methoden für $\zeta = 10^5$ dargestellt. Der optimale Äquivalenzfaktor bei PMP führt zur optimalen Stellgrößen. Ein nicht optimaler Äquivalenzfaktor führt dazu, dass die Traktionsbatterie sehr häufig die zulässigen SoC-Grenzen verletzt. Das führt zu sub-optimalen Ergebnissen. Um die Robustheit der MO-ECMS und cMO-ECMS zu vergleichen, wird der optimale Äquivalenzfaktor aus dem WLTC im SLT-Zyklus verwendet. Der „falsche“ Äquivalenzfaktor führt bei der MO-ECMS zur frühen Verletzung der zulässigen SoC-Grenze und zu einer großen Abweichung zwischen Anfangs- und End-SoC. Die SoC-Abweichung im Vergleich zwischen optimalem und nicht optimalem Äquivalenzfaktor bei cMO-ECMS ist kleiner als bei MO-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

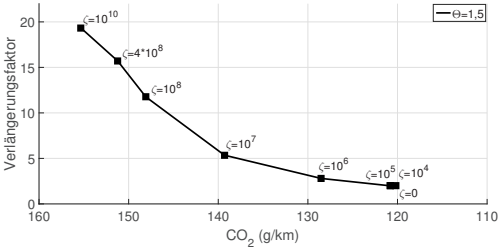


Abbildung 10: PARETO-Fronten von cMO-ECMS im SLT für den selben Gewichtungsfaktor für Batteriealterung Θ

ECMS. Durch die Einführung der Strafkosten reduziert sich die Sensitivität der Betriebsstrategie hinsichtlich des optimalen Äquivalenzfaktors.

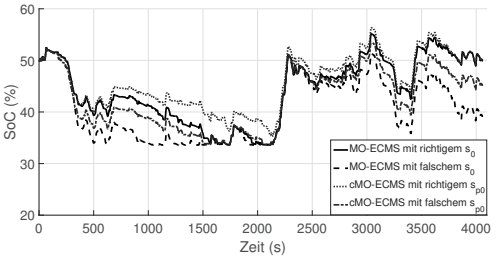


Abbildung 11: Robustheit der MO-ECMS und cMO-ECMS im SLT-Zyklus

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wird ein empirisches Modell für zyklische Batteriealterung vorgestellt und darauf basierend eine multikriterielle Betriebsstrategie unter Berücksichtigung der zyklischen Batteriealterung und des Kraftstoffverbrauchs durch die Methoden DP und PMP entwickelt. Insbesondere wird dabei die Aufteilung der Bremskraft zwischen Reibbremse und E-Antrieb optimiert. Simulationsergebnisse zeigen, dass die multikriterielle Betriebsstrategie die Lebensdauer der Traktionsbatterie verlängert und gleichzeitig mehr CO_2-Emissionen für ein Hybridfahrzeug verursacht. In einem Realfahrzyklus werden bei verdoppelter Lebensdauer der Traktionsbatterie 4,3% mehr CO_2-Emissionen erzeugt. Die multikriterielle Betriebsstrategie entscheidet anhand des Gewichtungsfaktors für Batteriealterung, ob nur die Betriebsmodi beim Antrieb oder auch die Betriebsmodi beim Bremsen beeinflusst werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Durch Einführung von Strafkosten für die SoC-Abweichung von einem Referenzwert SoC_{ref} verliert die multikriterielle Betriebsstrategie cMO-ECMS etwas an Optimierungspotenzial für die CO_2-Emissionen im Vergleich zur MO-ECMS. Jedoch wird die Robustheit der Betriebsstrategie erhöht. Das ungenutzte Potential zwischen cMO-ECMS und MO-ECMS kann durch die Verwendung von prädiktiven Daten erschlossen werden. Zum Beispiel können Geschwindigkeitsbegrenzungen, Steigungsinformationen, Kurven und Kreisverkehre entlang der vorausliegenden Fahrstrecke verwendet werden, um den SoC_{ref} der Betriebsstrategie anzupassen.
Die multikriterielle Betriebsstrategie kann auch für Traktionsbatterien verwendet werden, deren Kapazitätsverlust durch die zyklische Alterung unterproportional zum Amperestunden-Durchsatz ist. Die Implementierung kann beispielsweise durch eine Anpassung des Gewichtungsfaktors mithilfe des aktuellen SoH_C realisiert werden.

Literatur

[1] Serrao, L. , Sciarretta, A. , Grondin, O. , Chasse, A. , Creff, Y. , Di Domenico, D. , Pognant-Gros, P. , Querel, C. , u. Thibault, L. : Open Issues in Supervisory Control of Hybrid Electric Vehicles: A Unified Approach Using Optimal Control Methods. Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles, 2013, 68(1) S. 23–33.

[2] Vadamalu, R. S. u. Beidl, C. : Online Optimization Based Energy Management of Hybrid Electric Vehicles Using Direct Optimal Control. 16. Internationales Stuttgarter Symposium, 2016, S. 855–871.

[3] Li, S. , Maiterth, J. M. , Senft, S. , Hülshorst, T. , Stapelbroek, M. F. , Pfluger, J. , u. Küpper, M. : Considering the Aging of Lithium-Ion Battery in the Operation Strategy for Hybrid Commercial Vehicles. 2016, S. 1245–1260.

[4] Serrao, L. , Onori, S. , Sciarretta, A. , Guezennec, Y. , u. Rizzoni, G. : Optimal Energy Management of Hybrid Electric Vehicles Including Battery Aging. Proceedings of the 2011 American Control Conference, 2011, S. 2125–2130.

[5] Ebbesen, S. , Elbert, P. , u. Guzzella, L. : Battery State-of-Health Perceptive Energy Management for Hybrid Electric Vehicles. IEEE Transactions on Vehicular technology, 2012, 61(7) S. 2893–2900.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[6] Vetter, J. , Novák, P. , Wagner, M. , Veit, C. , Möller, K.-C. , Besenhard, J. , Winter, M. , Wohlfahrt-Mehrens, M. , Vogler, C. , u. Hammouche, A. : Ageing Mechanisms in Lithium-Ion Batteries. Journal of Power Sources, 2005, 147(1) S. 269–281.

[7] Dai, H. , Wei, X. , u. Sun, Z. : A New SOH Prediction Concept for the Power Lithium-Ion Battery Used on HEVs. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009, S. 1649–1653.

[8] Barré, A. , Deguilhem, B. , Grolleau, S. , Gérard, M. , Suard, F. , u. Riu, D. : A Review on Lithium-Ion Battery Ageing Mechanisms and Estimations for Automotive Applications. Journal of Power Sources, 2013, 241 S. 680–689.

[9] Basics of Lithium-Battery-Systems, Bosch Engineering GmbH, Abstatt, 2015.

[10] Andre, D. , Appel, C. , Soczka-Guth, T. , u. Sauer, D. U. : Advanced Mathematical Methods of SOC and SOH Estimation for Lithium-Ion Batteries. Journal of Power Sources, 2013, 224 S. 20–27.

[11] Omar, N. , Monem, M. A. , Firouz, Y. , Salminen, J. , Smekens, J. , Hegazy, O. , Gaulous, H. , Mulder, G. , Bossche, P. V. d., u. Coosemans, T. : Lithium Iron Phosphate Based Battery–Assessment of the Aging Parameters and Development of Cycle Life Model. Applied Energy, 2014, 113 S. 1575–1585.

[12] Schmalstieg, J. , Käbitz, S. , Ecker, M. , u. Sauer, D. U. : A Holistic Aging Model for Li (NiMnCo) O2 Based 18650 Lithium-Ion Batteries. Journal of Power Sources, 2014, 257 S. 325–334.

[13] Cordoba-Arenas, A. , Onori, S. , Guezennec, Y. , u. Rizzoni, G. : Capacity and Power Fade Cycle-Life Model for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Cells Containing Blended Spinel and Layered-Oxide Positive Electrodes. Journal of Power Sources, 2015, 278 S. 473–483.

[14] Takei, K. , Kumai, K. , Kobayashi, Y. , Miyashiro, H. , Terada, N. , Iwahori, T. , u. Tanaka, T. : Cycle Life Estimation of Lithium Secondary Battery by Extrapolation Method and Accelerated Aging Test. Journal of Power Sources, 2001, 97 S. 697–701.

[15] Ambühl, D. : Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles. Diss., ETH ZURICH, 2009.

[16] Bellman, R. : The Theory of Dynamic Programming. RAND CORP SANTA MONICA CA, 1954.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[17] Sundstrom, O. u. Guzzella, L. : A Generic Dynamic Programming Matlab Function. Control Applications,(CCA) & Intelligent Control,(ISIC), 2009, S. 1625–1630.

[18] Pontryagin, L. S. : Mathematical Theory of Optimal Processes. CRC Press, 1987.

[19] Geering, H. P. : Optimal Control with Engineering Applications. Zurich: Springer-Verlag, 2007.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Fraktionale Zeitbereichsidentifikation einer Lithium-Ionen-Zelle mit realen Messdaten

Dipl.-Ing. **Marius Eckert**, Prof. Dr.-Ing. **Sören Hohmann**,
Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme,
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Kurzfassung
In diesem Beitrag wird die in [4] vorgestellte Methode erstmalig eingesetzt, um die Parameter eines physikalisch motivierten fraktionalen Batteriemodells zu identifizieren. Im Unterschied zum aktuellen Stand der Technik erfolgt die Identifikation modellbasiert, ohne manuelle Zwischenschritte und ist daher auch für den laufenden Betrieb, z.B. in einem Elektrofahrzeug, geeignet. Die Generierung von Messdaten einer realen Lithium-Ionen Zelle der Firma KOKAM mit der Bezeichnung SLPB 834374H erfolgt mit einem am Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (IRS) vorhandenen Batteriemessstand. Die einzelnen Komponenten des Messstands und deren Vernetzung werden ausführlich dargelegt. Anhand der realen Messung wird gezeigt, dass sich sehr genaue Ergebnisse erzielen lassen und das Verfahren wenig rauschempfindlich ist.

1. Einleitung

Im Zuge der Energiewende ist die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen ein zentrales Thema in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Durch die Volatilität ist eine Energiespeicherung zwingend notwendig. In Zusammenhang mit der Energiewende ist die Elektrifizierung des Automobilbetriebs in den Fokus gerückt. Dafür ist auch eine Energiespeicherung von Nöten, die häufig mit Lithium-Ionen Batterien realisiert wird. Allerdings weist diese momentan noch den nicht unerheblichen Nachteil auf, dass sich die Speicherkapazität durch sogenannte Alterungsvorgänge verringert. Um die Effizienz der Batterie zu steigern, also möglichst viel der gespeicherten Energie zu nutzen, werden Batteriemanagementsysteme mit hochentwickelten Diagnosefunktionen benötigt. Eine Kernaufgabe der Diagnose ist die Identifikation des physikalischen Alterungszustands der Batterie im laufenden Betrieb.
Aktuelle Verfahren bilden die Alterungsprozesse in einer einzigen Maßzahl, dem sogenannten State of Health (SoH) [13], ab. Diese Größe ist allerdings nicht physikalisch motiviert. In diesem Beitrag bildet ein physikalisch motiviertes fraktionales Modell die Grundlage [2, 10]. Änderungen der Parameter lassen Rückschlüsse auf die Alterung und somit auf den physikalischen Zustand zu [10]. Die modellbasierte Identifikation der Parameter im Zeitbereich wird in diesem Beitrag erstmalig mit realen Messdaten durchgeführt. Dieses Vorgehen unterscheidet sich von signalbasierten Methoden wie der Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) [18, 23], welche den Stand der Technik repräsentiert.
Für die Identifikation wird die bereits in [4] vorgestellte Methode der Modulationsfunktionen für fraktionale Systeme eingesetzt. Der zentrale Schritt ist die Modulation der Messung mit einer geeignet zu wählenden Modulationsfunktion. In der Literatur gibt es erste Ansätze zur modellbasierten Identifikation fraktionaler Systeme, die jedoch aufwändig [24] und rauschempfindlich [7] sind und für die konkrete Anwendung mit realen Daten eher ungeeignet erscheinen.
Zur Erzeugung von Messdaten kommt ein am IRS des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) vorhandener Batteriemessstand zum Einsatz. Dieser unterscheidet sich von denen aus den Materialwissenschaften hauptsächlich dadurch, dass beliebige Signale mit hoher Dynamik aufgeschaltet werden können. Es werden keine aufwändigen Studien gezeigt, sondern die Funktionsweise des Identifikationsverfahrens an einer einzigen Zelle prinzipiell veranschaulicht. Die Ergebnisse lie-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

fern jedoch einen klaren Hinweis darauf, dass die Methode auch in der Anwendung im Fahrzeug eingesetzt werden kann.
Zum Einstieg in die Thematik werden in Abschnitt 2 kurz die wichtigsten Definitionen der bekannten fraktionalen Analysis vorgestellt. Basierend auf diesen Definitionen lässt sich das fraktionale Batteriemodell in Abschnitt 3 einführen. Die Messdaten werden mit dem Batteriemessstand generiert, welcher den Gegenstand von Abschnitt 4 bildet. Mit den Messdaten als Grundlage lässt sich die Identifikation durchführen. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 5 gezeigt.

2. Fraktionale Analysis

Für das allgemeine Verständnis werden die Grundlagen der fraktionalen Analysis, die im Rahmen dieses Beitrags wichtig sind, präsentiert. Ausgangspunkt ist die n-fache ganzzahlige Integration einer Funktion $f(t)$. Die n-fache Integration kann auf eine einfache, mit $\Gamma(n)^{-1}(t-\zeta)^{n-1}$ gewichtete Integration von $f(t)$ reduziert werden [14, S.29]:

$\forall\ \tilde{t} \leq 0 : f(\tilde{t}) = 0,\ n \in \mathbb{N}_{>0}$

$$\begin{aligned} {}_0i_t^n f(t) &:= \int_0^t \int_0^{\zeta_1} \dots \int_0^{\zeta_{n-1}} f(\zeta_n)\mathrm{d}\zeta_n \dots \mathrm{d}\zeta_2 \mathrm{d}\zeta_1 \\ &= \frac{1}{\Gamma(n)} \int_0^t \frac{f(\zeta)}{(t-\zeta)^{1-n}} \mathrm{d}\zeta. \end{aligned} \tag{1}$$

Dabei ist $\Gamma(n)$ die Gamma-Funktion, die nicht nur für die natürlichen Zahlen $n \in \mathbb{N}_{>0}$, sondern auch für sämtliche positive reelle Zahlen $\alpha \in \mathbb{R}^+$ definiert ist. Dies führt auf die linksseitige fraktionale Integration ${}_ei_t^\alpha$ nach Riemann-Liouville (RL) [22, S.33]:

$\forall\ \tilde{t} \leq e : f(\tilde{t}) = 0,\ \alpha \in \mathbb{R}^+$

$${}_ei_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_e^t \frac{f(\zeta)}{(t-\zeta)^{1-\alpha}} \mathrm{d}\zeta. \tag{2}$$

Für die Funktion $f(t)$ muss dabei gelten, dass diese in dem Integrationsbereich $[e,t]$ Lebesgue integrierbar ist [15, S.72].
Mit Hilfe der fraktionalen Integration kann die fraktionale Ableitung mit der Ordnung $\alpha \in \mathbb{R}^+$ berechnet werden. Zur Berechnung existieren mehrere Ableitungsdefinitionen, die u. a. in [22] und [15] beschrieben werden. In diesem Beitrag werden die RL-Ableitung sowie die Caputo (C)-Ableitung betrachtet. Bevor die Ableitungsdefinitionen angegeben werden, sind zwei weitere Operatoren einzuführen:

$$\lceil \alpha \rceil := \min\{k \in \mathbb{Z} | k > \alpha\}, \tag{3}$$

$$\lfloor \alpha \rfloor := \lceil \alpha \rceil - 1. \tag{4}$$

Damit lassen sich die beiden linksseitigen fraktionalen Ableitungen angeben [1]:

$\forall\ \tilde{t} \leq e : f(\tilde{t}) = 0,\ \alpha \in \mathbb{R}^+$

$${}_edRL_t^\alpha f(t) := \left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)^{\lfloor\alpha\rfloor+1} \left[{}_ei_t^{\lfloor\alpha\rfloor+1-\alpha} f(t)\right], \tag{5}$$

$${}_edC_t^\alpha f(t) := {}_ei_t^{\lfloor\alpha\rfloor+1-\alpha} \left[\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)^{\lfloor\alpha\rfloor+1} f(t)\right]. \tag{6}$$

Für die Funktionen $f(t)$ muss in diesem Fall gelten, dass sie $\lceil\alpha\rceil$-fach absolut kontinuierlich im Intervall $[e,t]$ sind.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3. Physikalisch motiviertes fraktionales Batteriemodell

Für die Diagnose ist es notwendig, dass die im Batteriemodell beschriebenen Parameter physikalisch interpretierbar sind. In der Literatur lassen sich Mikromodelle finden, die dieser Anforderung gerecht werden [5]. Diese Modelle sind sehr komplex und daher für den praktischen Einsatz nicht anwendbar. Zahlreiche Verfahren setzen daher Makromodelle ein. Die Parameter lassen sich mit herkömmlichen Verfahren der Regelungstechnik identifizieren [21]. Der Nachteil der Makromodelle ist jedoch, dass die Parameter keine physikalische Bedeutung besitzen. Die positiven komplementären Eigenschaften von Mikro- und Makromodellen sind in den sogenannten Mesomodellen vereinigt. Die Komplexität ist überschaubar und dennoch sind die verwendeten Parameter physikalisch motiviert [8, 16].

Aus den Materialwissenschaften ist bekannt, dass mehrere Verlustprozesse die Batterieimpedanz bestimmen. Wesentliche Verlustprozesse sind der Ladungstransfer und die Diffusion. Letzterer ist Hauptgegenstand dieses Beitrags und lässt sich mittels der Fick'schen Gesetze beschreiben. Das verteiltparametrische Verhalten aufgrund der räumlichen und zeitlichen Abhängigkeit der Konzentration führt auf eine partielle Differentialgleichung (PDGL). Das Lösen und Auswerten der PDGL führt auf ein sogenanntes Warburg-Element [12]. Dieses lässt sich als *RQ*-Element formulieren [2],[9, S.42]:

$R, Q \in \mathbb{R}^+,\ \alpha \in (0,1)$

$$G_{RQ}(j\omega) = \frac{R}{1+\tau_0 (j\omega)^{\alpha}}, \quad \tau_0 = RQ. \tag{7}$$

Da $\alpha \in (0,1)$ gilt, ist Gl. (7) ein fraktionales System. Für $\alpha = 1$ ergibt sich das klassische RC-Element. Nicht nur die Diffusion lässt sich als ein fraktionales System beschreiben, auch zahlreiche weitere Beispiele existieren, z. B. in [19] oder [20]. Da mehrere Diffusionsprozesse ablaufen, lässt sich die Diffusionsimpedanz nach [9, S.151-156] als eine Summe von *RQ*-Elementen beschreiben:

$R_k, Q_k \in \mathbb{R}^+,\ \alpha_k \in (0,1)$

$$G_{diff}(j\omega) = \sum_{k=1}^{L} \frac{R_k}{1+\tau_{0,k} (j\omega)^{\alpha_k}}, \quad \tau_{0,k} = R_k Q_k. \tag{8}$$

Da die Diffusion der langsamste Vorgang in der Batterie ist, können sämtliche andere Verlustprozesse bei reiner Betrachtung der Diffusion als ein ohmscher Widerstand repräsentiert werden:

$$G_{VP} = \sum_{k=1}^{N} R_k. \tag{9}$$

Dieses ist zulässig, weil der Ladungstransfer nahezu vollständig abgeschlossen ist, wenn die Diffusion sichtbar wird [13]. Dadurch ergibt sich ein vereinfachtes fraktionales Batteriemodell, das für den niederfrequenten Bereich gültig ist und zur Demonstration des Identifikationsverfahrens eingesetzt wird:

$$\begin{aligned} G(j\omega) &= G_{VP} + G_{diff} \\ &= R_0 + \frac{R}{1+\tau_0 (j\omega)^{\alpha}} \\ &= \frac{b_0 + b_1 (j\omega)^{\alpha}}{a_0 + (j\omega)^{\alpha}}, \end{aligned} \tag{10}$$

mit: $b_0 = \frac{R_0+R}{\tau_0}$, $b_1 = R_0$, $a_0 = \frac{1}{\tau_0}$, $\tau_0 = RQ$. Durch die inverse Fourietransformation [17, S.48,49] von Gl. (10) ergibt sich die Zeitbereichsdarstellung mit dem Ableitungsoperator (5)

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

bzw. (6) zu:

$$ {}_{t_0}d_t^{\alpha}U(t) = \begin{bmatrix} -U(t) & i(t) & {}_{t_0}d_t^{\alpha}i(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ b_1 \end{bmatrix} . \tag{11} $$

In Gl. (11) ist $i(t)$ der gemessene Strom und $U(t)$ die gemessene Spannung. Die Gl. (11) hat die Form einer fraktionalen Differentialgleichung [20, S.122]. Die tatsächliche Batteriespannung ergibt sich aus der Spannung $U(t)$ und der Ruhespannung [13, S.16]. Die Ruhespannung u_0 lässt sich im relaxierten Zustand messen und wird im Folgenden als bekannt angenommen.

4. Batteriemessstand

Am IRS befindet sich ein Batteriemessstand, mit dem es möglich ist, die Batterieidentifikation anhand realer Messdaten durchzuführen. Im Unterschied zu sonst gängigen Aufbauten in materialwissenschaftlichen Labors können Messungen mit beliebiger Signalform durchgeführt werden. Im Folgenden werden der in Bild 1 gezeigte Messstand und dessen Komponenten detailliert beschrieben.

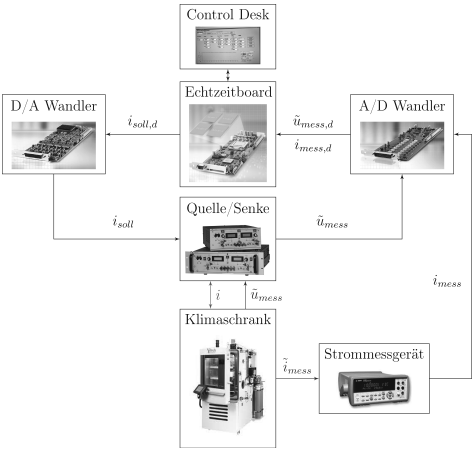


Bild 1: Batteriemessstandsaufbau am IRS. Die Größen $\tilde{u}_{mess}$ und $\tilde{i}_{mess}$ bezeichnen die gemessene Spannung und den gemessenen Strom und i den Lade- und Entladestrom.

Die Zelle befindet sich während der Messung in einer Klimakammer der Marke VÖTSCH. Die Problematik mit unsachgemäßer Behandlung von Lithium-Ionen Zellen ist in der Literatur sehr gut bekannt und dokumentiert [13]. Bei falscher Handhabung der Zellen, wie bei Überladung, Unterladung, Ladung bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, Kurzschluss, externer Erhitzung, Verformung, etc. kann es zu einer Selbsterwärmung und dadurch zu einem *Thermal Runaway* kommen [6, 25]. Dies stellt eine exotherme chemische Reaktion dar, die zum Brand oder sogar zur Explosion der Zelle führen kann. Deshalb ist der Klimaschrank mit CO_2-Druckbehältern und mit einem CO-Sensor Polytron7000 von DRÄGER ausgestattet. Die Klimakammer kann vom PC aus mit der SIMPATI-Software oder direkt über das Bedienpanel gesteuert werden. Weiter werden Signalquellen und -senken mit hoher Flankensteilheit, sowie ein Echtzeitboard mit den notwendigen I/O-Karten zur Ansteuerung des Geräts und der dazugehörigen Steuerungssoftware (Control Desk) benötigt. Die verwendeten Geräte haben folgende Spezifikationen:

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

- dSpace DS1006 (Echtzeitboard)
  - Quad-Core AMD Opteron Prozessor 2.8 GHz
  - 20 MB/s Übertragungsrate
- dSpace DS-2102 (D/A-Wandler)
  - Auflösung: 16 Bit
  - Ausgangsspannungsbereich ± 5 V
  - Umwandlungsdauer 1.6 μs
- dSpace DS-2004 (A/D-Wandler)
  - Auflösung: 16 Bit
  - Spannungsbereich ± 5 V
  - Umwandlungsdauer 0.8 μs
- Kepco *Bipolar Operational Power Supply 20V-20A Max* (BOP20-20M) (Vierquadrantensteller)
  - Quelle und Senke, sowohl Strom- als auch Spannungsvorgabe möglich, analoge Ansteuerung
  - max. Strom ± 20 A, max. Spannung ± 20 V, max. Leistung 400 W
  - Anstiegs- und Abstiegszeit eines Strom- und Spannungssprungs von 35 μs
- Vötsch VC^3 4018 (Klimaschrank)
  - Temperaturbereich: −40 °C bis +180 °C
  - Prüfrauminhalt: 190 Liter
  - Feuchtigkeitsregelung
- Agilent 34410A (Digitalmultimeter)
  - $6\frac{1}{2}$ Stellen Auflösung
  - Genauigkeit: 0.0030 % DC, 0.06 % AC
  - 10000 Messungen/s bei $5\frac{1}{2}$ Stellen
  - 1000 Messungen/s bei $6\frac{1}{2}$ Stellen

Um die Signale zur Identifikation zu erzeugen, wird Rapid Prototyping verwendet. Die Matlab/Simulink-Modelle zur Signalgenerierung werden direkt in C-Code übersetzt und auf das dSpace DS1006 Echtzeitboard geladen. Dazu existiert eine virtuelle Oberfläche (dSpace Control Desk), mit welcher man verschiedene Signalformen, wie z.B. Pseudo-Random Binary Sequence (PRBS), Chirp oder Sägezahn, auswählen kann. Zudem lässt sich die Abtastzeit einstellen oder die Messdauer begrenzen. Über den D/A-Wandler DS-2102, ebenfalls von dSpace, wird der Vierquadrantensteller BOP20-20M des Herstellers Kepco gesteuert, welcher als Quelle und Senke der Singalerzeugung des vorgegebenen Stroms dient. Zur Spannungsmessung wird der gleiche Vierquadrantensteller verwendet. Das analoge Messsignal der Batteriespannung wird durch den A/D-Wandler DS-2004 digitalisiert und an das Echtzeitboard weitergegeben. Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, wird der Strom über das Strommessgerät 34410A von Agilent gemessen. Die

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

so erhaltenen Messdaten werden auf dem PC gespeichert und für die fraktionale Identifikation als Validierungsdaten verwendet.
Die Spannungs- und Strommessung beruht auf dem Vierpunktmessprinzip, bei welchem die Messkontaktierungen getrennt von der Leitung sind. Um die Kontaktwiderstände möglichst klein zu halten, werden Kupferelektroden eingesetzt.

5. Batterieidentifikation
In diesem Abschnitt wird die in [4] vorgestellte Methode der Modulationsfunktionen eingesetzt, um eine reale Batteriezelle zu identifizieren. Bei der Zelle handelt es sich um eine Lithium-Polymer (LiPO) Zelle von KOKAM mit Graphit an der Anode und einem Blend aus Nickel-Cobalt-Aluminium und Cobaltoxid an der Kathode mit der Bezeichnung SLPB 834374H. Der State of Charge (SoC) beträgt SoC=50 % und die Zelle wird von dem Klimaschrank auf Raumtemperatur gehalten. Zur Erzeugung der Strom- und Spannungsdaten dient die in Abschnitt 4 vorgestellte Batteriemessstandsumgebung. Der Strom $i(t)$ wird mit dem BOP20-20M vorgegeben und die Spannung $\tilde{u}_{mess}(t)$ gemessen. Die Spannungsmessung hatte eine sehr niedrige Signal-to-Noise Ratio (SNR) von 37,94 dB. Ein Ausschnitt der Daten ist in Bild 2 dargestellt.

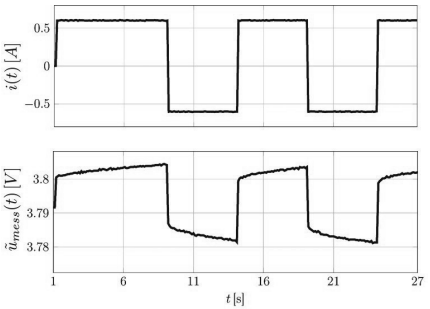


Bild 2: Ausschnitte aus der mit dem BOP20-20M a) erzeugten Stromvorgabe und b) mit f_s=10 Hz abgetasteten Spannungsmessung für die Kokam LiPO-Zelle bei SoC=50%

Bei dem Stromsignal handelt es sich um eine mit einem 8-Bit Schieberegister erzeugte PRBS mit einer Amplitude von 0,6 A und einer Periodendauer von 5 s, welche dafür sorgt, dass die Zelle stark angeregt wird [11]. Bei positivem Strom wird die Zelle geladen, bei negativem Strom entladen. Im Mittel bleibt der SoC konstant. Bei Entladung verkleinert sich die Batteriespannung, bei Ladung vergrößert sie sich.
Zur Charakterisierung der Zelle wurde der frequenzabhängige komplexe Widerstand in dem Frequenzbereich von 1 Mhz-1 mHz mit der EIS am Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffe der Elektrotechnik (IAM-WET) des KIT mit dem SOLATRON 1470E Impedanzanalyzer aufgenommen (siehe Bild 3).
Die EIS ist eine, im Gegensatz zur Methode der Modulationsfunktionen, signalbasierte Methode, welche die Impedanz durch Anregung der Batterie mit einem sinusförmigen Stromsignal punktweise aufnimmt [18]. Hierbei muss abgewartet werden, bis die Batterie eingeschwungen ist, was bei der Messung in diesem Beitrag 4-5 Perioden gedauert hat. Die EIS benötigt für den hier betrachteten Fall ein sehr gutes Messsignal mit einem SNR>100 dB. Physikalisch betrachtet zeigt sich in Bild 3, wie in Abschnitt 3 beschrieben, im mittleren Frequenzbereich zwischen 1 Mhz und 1 Hz der Ladungstransfer, also der Übergang der Lithium-Ionen in den Elektrolyten, und im niederfrequenten Bereich von 1 Hz bis 1 mHz die Lithium-Festkörperdiffusion. Der vorliegende

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

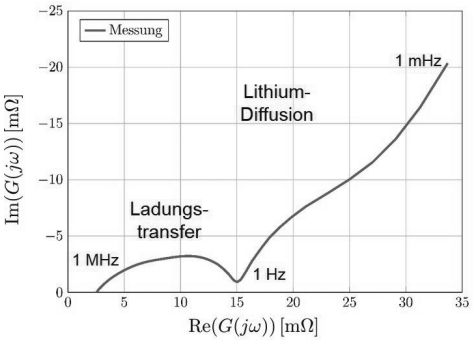


Bild 3: Frequenzabhängiger Widerstand der LiPO-Zelle

Beitrag beschäftigt sich, wie zuvor beschrieben, ausschließlich mit dem niederfrequenten Diffusionsbereich mit der mathematischen Beschreibung aus Gl. (11):

$$ {}_{t_0}d_t^{0,67}U(t) = \begin{bmatrix} -U(t) & i(t) & {}_{t_0}d_t^{0,67}i(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ b_1 \end{bmatrix} . \tag{12} $$

Die Spannung $U(t)$ ergibt sich hierbei aus der gemessenen Spannung $\tilde{u}_{mess}(t)$ abzüglich der Ruhespannung u_0. Die Ruhespannung wird zuvor gemessen, in dem die Zelle mit einer sehr geringen Stromstärke entladen wird und dann als Kennlinie abgelegt. Das Ziel ist nun, mit der Methode der Modulationsfunktionen aus [4] die Parameter a_0, b_0, b_1 im Zeitbereich direkt zu identifizieren. Als Modulationsfunktion kommt die in [4] beschriebene Spline-Typ-Funktion zum Einsatz. Die fraktionale Ableitungsordnung $\alpha = 0,67$ wird vorher beispielsweise mit dem in [3] beschriebenen algebraischen Verfahren bestimmt.
Der Ablauf der Verifikation ist in Bild 4 dargestellt. Die Zelle wird mit dem PRBS-Stromsignal beaufschlagt und die Spannung gemessen. Beide Größen werden dann dem Modulationsfunktionsverfahren zur Verfügung gestellt, welches die Parameter identifiziert. Mit den geschätzten Parametern $\hat{a}_0$, $\hat{b}_0$, $\hat{b}_1$ lässt sich dann das Batteriemodell (12) parametrieren und eine Batteriesimulation durchführen. Das Resultat wird mit dem tatsächlichen Spannungsverlauf verglichen. Außerdem wird die Impedanz berechnet und mit der Referenz aus Bild 3 verglichen.
Das Ergebnis der Impedanzbestimmung zeigt Bild 5. Die Zahlenwerte für die identifizierten Parameter lauten $\hat{a}_0 = 10,5$, $\hat{b}_0 = 0,0345$, $\hat{b}_1 = 0,1$.
Es ist zu erkennen, dass die identifizierte Kurve sehr gut mit der Referenz übereinstimmt. Der mittlere Fehler beträgt 1,35 %. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Identifikation bei einem sehr niedrigen SNR=37,94 dB möglich ist, während für die Referenzmessung ein SNR>100 dB erforderlich ist. Das Verfahren ist also für den betrachteten Fall sehr wenig rauschempfindlich. Unverkennbar ist allerdings auch die Verschiebung auf der reellen Achse. Denn der ohmsche Widerstand wurde um 5 % niedriger als die Referenz geschätzt. Als Ursache für die Abweichung auf der reellen Achse wird der ohmsche Innenwiderstand der Kabel vermutet, da für die EIS-Messung andere Kabel als bei der Spannungsmessung am Batteriemessstand verwendet wurden. Möglich ist natürlich auch, dass die Zellparameter sich zwischen den Parameterbestimmungen durch Alterung verändert haben oder sich die Temperatur im Inneren der Zelle trotz Klimaschrank geändert hat. Außerdem könnte das eher geringe SNR im Falle einer schlechten Konditionierung

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

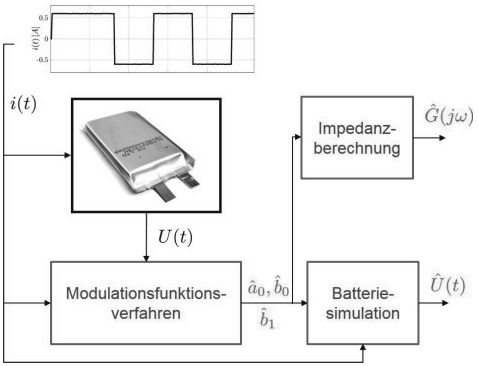


Bild 4: Ablauf der Verifikation

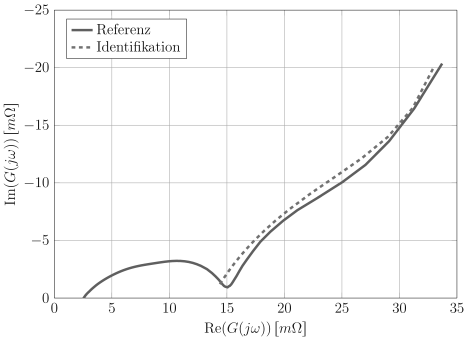


Bild 5: Verlauf der identifizierten Impedanz und der Referenz

der Regressormatrix $\underline{M}$ zu Problemen bei der LS-Optimierung geführt haben. Auch bei einer gut konditionierten Matrix kann das hohe Rauschen zu einem Offsetfehler in den Parametern durch die LS-Optimierung führen. Dies ist vergleichbar mit dem Biasfehler bei der klassischen LS-Schätzung [11, S.230]. Die sehr akkuraten Ergebnisse im Frequenzbereich bestätigen sich auch beim Vergleich der simulierten mit der gemessenen Spannung, dargestellt in Bild 6.

6. Zusammenfassung

Dieser Beitrag demonstrierte den Einsatz der Methode der Modulationsfunktionen für fraktionale Systeme für die Identifikation physikalischer Batterieparameter. Hierbei wurde angenommen, dass die fraktionale Ableitungsordnung bekannt ist. Um die Methode anwenden zu können, wurde ein Messstand vorgestellt, welcher in der Lage ist, Messdaten (Strom und Spannung) einer realen Lithium-Ionen Zelle aufzunehmen. Die einzelnen Komponenten wurden detailliert beschrieben und ihre Spezifikationen angegeben. Es hat sich herausgestellt, dass das Verfahren genaue Ergebnisse mit einer mittleren Abweichung von 1,35 % zur Referenz erzielt und bis zu einem sehr niedrigen SNR von 37,94 dB eingesetzt werden kann. Zum Vergleich: Die EIS als Stand der

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

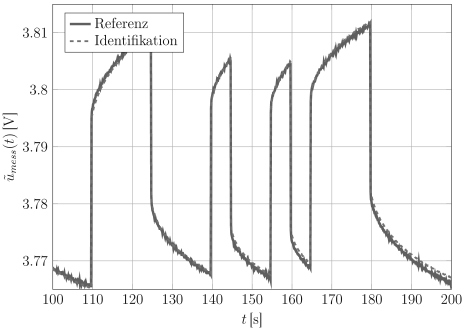


Bild 6: Verlauf der Batteriesimulation und der gemessenen Spannung

Technik benötigte sehr genaue Messungen mit einem SNR von >100 dB, um verwertbare Daten zu generieren. Da die vorgestellte Methode außerdem automatisch ablaufen kann, liefert dieser Beitrag klare Indizien für einen möglichen Einsatz im Elektrofahrzeug.

Literatur

[1] O. P. Agrawal. Analytical schemes for a new class of fractional differential equations. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 40(21):5469–5477, 2007.

[2] K. Cole and R. Cole. Dispersion and absorption in dielectrics i. alternating current characteristics. *The Journal of Chemical Physics*, 9:341–351, 1941.

[3] M. Eckert, L. Kölsch, and S. Hohmann. Fractional algebraic identification of the distribution of relaxation times of battery cells. In *Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 2101–2108, Osaka, Japan, December 2015.

[4] M. Eckert, M. Kupper, and S. Hohmann. Functional fractional calculus for system identification of battery cells. *at - Automatisierungstechnik*, 62(4):272–281, 2014.

[5] M. Ender, J. Joos, T. Carraro, and E. Ivers-Tiffée. Three-dimensional reconstruction of a composite cathode for lithium-ion cells. *Electrochemistry Communications*, 13(2):166–168, 2011.

[6] M. Fleischhammer, T. Waldmann, G. Bisle, B.-I. Hogg, and M. Wohlfahrt-Mehrens. Interaction of cyclic ageing at high-rate and low temperature and safety in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2014.

[7] N. Gehring and J. Rudolph. An algebraic approach for identification of linear systems with fractional derivatives. *arXiv online library, Cornell University Library*, 2013.

[8] M. Haschka and V. Krebs. *Advances in Fractional Calculus: Theoretical Developments and Applications in Physics and Engineering*, chapter A Direct Approximation of Fractional Cole-Cole Systems by Ordinary First-order Processes, pages 257–270. Springer Netherlands, 2007.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[9] J. Illig. *Physically based Impedance Modelling of Lithium-Ion Cells*. PhD thesis, Karlsruher Institute of Technology (KIT), 2014.

[10] J. Illig, T. Chrobak, M. Ender, J. P. Schmidt, D. Klotz, and E. Ivers-Tiffée. Studies on lifepo4 as cathode material in li-ion batteries. *ECS Transactions*, 28(30):3–17, 2010.

[11] R. Isermann and M. Münchhof. *Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*. Heidelberg [u.a.]: Springer, 2011.

[12] T. Jacobsen and K. West. Diffusion impedance in planar, cylindrical and spherical symmetry. *Electrochimica Acta*, 40(2):255–262, 1995.

[13] A. Jossen and W. Weydanz. *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. Reichardt Verlag, 2006.

[14] T. Kaczorek. *Selected Problems of Fractional Systems Theory*, volume 411 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

[15] A. A. Kilbas, H. M. Srivastava, and J. J. Trujillo. *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*. Elsevier, 2006.

[16] D. Linden and T. B. Reddy. *Handbook of Batteries*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 3 edition, 2002.

[17] C. Lorenzo and T. Hartley. Initialization, conceptualization and application in the generalized fractional calculus. Technical report, National Aeronautics and Space Administration (NASA), 1998.

[18] J. Macdonald and E. Barsoukov. *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications*. John Wiley & Sons, 1987.

[19] K. B. Oldham and J. Spanier. The fractional calculus theory and applications of differentiation and integration to arbitrary order. *Mathematics in Science and Engineering*, 111:1–234, 1974.

[20] I. Podlubny. Fractional differential equations. an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications. *Mathematics in Science and Engineering*, 198:1–340, 1999.

[21] G. K. Prasad and C. D. Rahn. Model based identification of aging parameters in lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 232:79–85, 2013.

[22] S. G. Samko, A. A. Kilbas, and O. I. Marichev. *Fractional Integrals and Derivatives*. Gordon and Breach Science Publishers, 1993.

[23] D. Stroe, M. Swierczynski, A. I. Stan, V. Knap, R. Teodorescu, and S. J. Andreasen. Diagnosis of lithium-ion batteries state-of-health based on electrochemical impedance spectroscopy technique. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014.

[24] S. Victor, R. Malti, H. Garnier, and A. Ostaloup. Parameter and differentiation order estimation in fractional models. *Automatica*, 49:926–935, 2013.

[25] T. Waldmann, M. Wilka, M. Kasper, M. Fleischhammer, and M. Wohlfahrt-Mehrens. Temperature dependent ageing mechanisms in lithium-ion batteries - a post-mortem study. *Journal of Power Sources*, 2014.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Zeitoptimale Trajektorienplanung für automatisiertes Fahren im fahrdynamischen Grenzbereich

Eine modellbasierte Rundenzeitoptimierung für seriennahe Fahrzeuge

Dipl.-Ing. **Ingmar Gundlach**, Prof. Dr.-Ing. **Ulrich Konigorski**,
TU Darmstadt; Dr.-Ing. **Jens Hoedt**, Volkswagen AG, Wolfsburg

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem mittels einer nichtlinearen Optimierung eine Rennlinie berechnet wird, welche auf einem nichtlinearen Einspurmodell mit PACEJKA-Reifenkennlinie basiert. Der Fokus liegt auf einer rechenzeit-effizienten Umsetzung. Zur besseren Beurteilung der Ergebnisse wird ein Überblick über bereits existierende Ansätze gegeben. Der Ansatz sieht eine Transformation aller Zeitabhängigkeiten in wegabhängige Größen vor und kann darüber die tatsächliche Fahrzeit minimieren. Abschließend werden Ergebnisse der Optimierung anhand einer ausgewählten Strecke präsentiert.

1. Einführung und Stand der Technik

Um automatisiert fahren zu können, ist neben der Regelung des Fahrzeugs die Berechnung der optimalen Trajektorie von entscheidender Bedeutung. Diese Trajektorie muss die Modellgleichungen erfüllen und Beschränkungen wie Fahrbahnränder einhalten. Zudem ist ein Gütemaß zu formulieren, das die Qualität einer Trajektorie beurteilt. Hierdurch entsteht bei der Trajektorienplanung ein komplexes nichtlineares dynamisches Optimierungsproblem. In diesem Beitrag wird speziell die zeitoptimale Trajektorienplanung betrachtet, die das Ziel hat, einen vorgegebenen Streckenverlauf in möglichst kurzer Zeit zu durchfahren. Die Berechnung solcher Rennlinien ist zum einen im Rennsport von Interesse, um die Ideallinie in Abhängigkeit von Fahrzeugparametern zu bestimmen. Zum anderen können die Ergebnisse genutzt werden, um Fahrzeuge zu entwickeln und zu testen, die automatisiert am physikalischen Limit fahren können. Ein mögliches Einsatzgebiet dieser Technik sind automatische Ausweichmanöver, die es aufgrund äußerer Einflüsse (plötzliche Hindernisse oder niedrige Reibwerte) erfordern, den Kraftschluss vollständig auszunutzen.

Die Ansätze in der Literatur lassen sich in drei Kategorien unterteilen [1]: Mit statischen Modellen werden Längs- und Querplanung entkoppelt und zeitlich hintereinander ausgeführt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Quasi-statischen Ansätzen (QSS) liegt die Annahme zugrunde, dass die Strecke in Segmente unterteilt werden kann, in denen die Fahrzeugdynamik jeweils als statisch angenommen werden kann. Ein frühes Beispiel hierfür ist [2], wo Brems-, Einlenk- und Beschleunigungspunkte so optimiert werden, dass die Krümmung der Rennlinie minimal wird. Hendrikx et al. [3] berücksichtigen transiente Vorgänge und verwenden ein Modell mit 3 Freiheitsgraden und quasistatischer Lastverteilung, um ein Spurwechsel-Manöver zu optimieren. Casanova [4] optimierte erstmalig einen gesamten Rundkurs mit einem recht komplexen Fahrzeugmodell. Die Optimierung in SNOPT dauert für den 4728 m langen Barcelona-Circuit auf einer Sun-Workstation zwischen 28 und 60 Stunden (im Jahr 2000). Kelly [5] erweitert 2008 den Ansatz und erreicht es, den 4423 m langen Jerez-Circuit bei einer Diskretisierung von 10 m auf einer 2,4 GHz-CPU in 8 Stunden zu optimieren.
Perantoni et al. [6] verwenden 2013 einen ähnlichen Ansatz wie Casanova [4], jedoch mit dem Schwerpunkt, keine steife Fahrzeug-Dynamik zu verwenden und die Ableitungen durch zentrale Differenzenquotienten weich zu machen. Er optimierte die Rennlinie für den Barcelona-Circuit mit Ipopt in weniger als 15 Min bei einer Diskretisierung von 2 m.
Die langen Rechenzeiten führen vermehrt dazu, dass entweder QSS-Modelle eingesetzt werden, welche in der Formel 1 recht verbreitet sind [6], oder andere Vereinfachungen, wie die Verwendung eines konvexen Gütemaßes mit linearen Nebenbedingungen genutzt werden, wie in [7]. Brayshaw [8] kann 2004 den Barcelona-Circuit quasistatisch auf einem 1 GHz-PC in 16 Minuten optimieren. Jedoch liegt die simulierte Rundenzeit fast 2,2 s über dem Wert von Casanova [4], was im Rennsport auf dieser Distanz relativ viel ist.
Kapania [9] nutzt 2016 eine quasistatische Optimierung und erreicht kurze Rechenzeiten. Er löst iterativ zwei Subprobleme: das erste berechnet für eine gegebene Linie an jedem Kurvenapex stationär die maximale Geschwindigkeit und ermittelt dann durch Vorwärts- und Rückwärtsintegration das gesamte Geschwindigkeitsprofil. Das zweite Subproblem minimiert in einem konvexen Optimierungsproblem die Krümmung der Rennlinie für das gegebene Geschwindigkeitsprofil anhand eines linearisierten Einspurmodells.
Gerdts et al. [10] verwenden ein Einspurmodell, um den Streckenverlauf lokal zu optimieren und benötigen 2009 für die Rennstrecke in Oschersleben knapp 12 Min. auf einem 2,66 GHz-PC mit einem SQP-Verfahren bei einem Vorschauhorizont von 10 s.

In dieser Arbeit wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem mittels einer nichtlinearen Optimierung in Ipopt [11] ein gesamter Rundkurs berechnet wird. Das Modell basiert auf einem nichtlinearen Einspurmodell mit PACEJKA-Reifenkennlinie und kann longitudinal eine dynamische Radlastverteilung approximativ berücksichtigen. Die Beschreibung der Strecke ist ähnlich zu [4, 6].

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Rechenzeiten mit Matlab auf einem Intel i7 QM liegen für 5 km Streckenlänge meist unter 3 s. Zusätzlich beschreibt der Beitrag eine Methode zur Filterung parametrierter Linien, welche eingesetzt wird, um eine glatte Referenzlinie für die Optimierung zu berechnen.

2. Gütemaß und Fahrbahnkoordinaten

Neben dem Fahrzeugmodell spielt die Wahl des Koordinatensystems eine entscheidende Rolle für die Formulierung eines geeigneten Gütemaßes. Ein ideales Gütemaß minimiert die reine Fahrzeit, also

$$\min J = \int_{t=0}^{T_{\text{end}}} \mathrm{d}t. \tag{2.1}$$

Ist die Zeit, wie üblich, ein unabhängiger Parameter, entsteht also ein Optimierungsproblem mit freier Endzeit T_{end}. Ein weiterer Nachteil ist, dass bei einer Diskretisierung die Stützstellenverteilung nicht nur vom Streckenverlauf sondern auch von der Geschwindigkeit abhängt, sodass sich bei hoher Geschwindigkeit weniger Stützstellen pro Weg ergeben. Da der gesamte Streckenverlauf aber im Vorfeld bekannt ist, bietet es sich an, die Wegkoordinate s einer Referenzlinie auf der Fahrbahn als unabhängigen Parameter zu verwenden und die zu optimierende Zeit als abhängige Größe zu modellieren. So kann die Problematik einer freien Endzeit im Gütefunktional umgangen werden und alle Größen sind wegbezogen. Hierfür muss allerdings ein analytischer Zusammenhang zwischen dem Weginkrement $\mathrm{d}s$ und dem Zeitinkrement $\mathrm{d}t$ ermittelt werden. Der Zusammenhang $\mathrm{d}s/\mathrm{d}t$ kann alleine auf Basis geometrischer und kinematischer Beziehungen angegeben werden und ist für eine Geschwindigkeit in s-Richtung $v_{\text{s}} > 0$ auch invertierbar. Die Referenzlinie wird hierfür durch ihre Krümmung $\kappa(s)$ und ihre Orientierung beschrieben, die relative Position und Ausrichtung des Fahrzeugschwerpunkts durch den orthogonalen Abstand $d(s)$ und den Winkel zur Tangente der Referenzlinie $\psi_{\text{t}}(s)$, s. Abbildung 1. Das Gütemaß ist also die Integration des Zeitinkrements über die gesamte Strecke mit

$$\min J = \int_{s=0}^{s_{\text{end}}} \sigma(s)\,\mathrm{d}s\ , \qquad \sigma \coloneqq \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}s} \tag{2.2}$$

und insofern die Fahrzeit selbst.

Ein alternativer Ansatz in [7] minimiert nicht die Fahrzeit pro Strecke, sondern maximiert den (linearisierten) Fortschritt auf einer Referenzlinie (Fahrbahnmitte) pro Zeit. In [10] wird für einen fixen Zeithorizont T_{end} die zurückgelegte Strecke auf die Ränder projiziert und maximiert, während zusätzlich die Lenkwinkelgeschwindigkeit minimiert wird.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

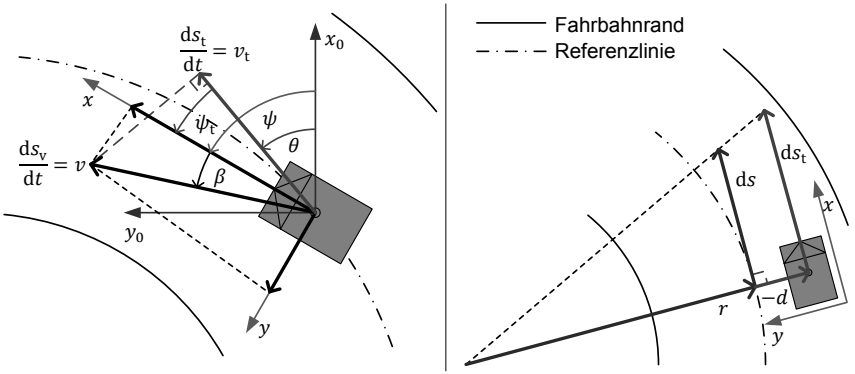


Bild 1: Kinematik des Fahrzeugs

3. Transformation der unabhängigen Variable

Der Zusammenhang zwischen dem Streckeninkrement $\mathrm{d}s$, also der zurückgelegten Strecke projiziert auf die Referenzlinie, und dem Zeitinkrement $\mathrm{d}t$ wird über die Transformationskette

$$\sigma^{-1} = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}s_\mathrm{t}} \frac{\mathrm{d}s_\mathrm{t}}{\mathrm{d}s_\mathrm{v}} \frac{\mathrm{d}s_\mathrm{v}}{\mathrm{d}t} \tag{3.1}$$

hergeleitet [4]. Abbildung 1 zeigt links die Bewegungsrichtungen des Fahrzeugs auf der Referenz, womit die Rotation beschrieben wird, und rechts die Bewegung des Fahrzeugs mit einem Querversatz d zur Referenz, welcher orthogonal zur Referenz gemessen wird.

$\frac{\mathrm{d}s_\mathrm{t}}{\mathrm{d}t}$ gibt die Fahrzeugbewegung an, wenn der Fahrzeugschwerpunkt exakt der Referenz folgt, während die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit durch

$$\frac{\mathrm{d}s_\mathrm{v}}{\mathrm{d}t} = v \tag{3.2}$$

gegeben ist. Eine reine Rotation, also ein Gieren auf der Referenz, wird durch

$$\frac{\mathrm{d}s_\mathrm{t}}{\mathrm{d}s_\mathrm{v}} = \cos(\psi_\mathrm{t} + \beta), \qquad \psi_\mathrm{t} \coloneqq \psi - \theta. \tag{3.3}$$

beschrieben. Ein Querversatz des Fahrzeugs radial zur Referenz um den Abstand d kann über den Strahlensatz berechnet werden:

$$\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}s_\mathrm{t}} = \frac{r}{r-d} = \frac{1}{1-\kappa_\mathrm{ref} d}, \qquad \kappa_\mathrm{ref} = \frac{1}{r} \tag{3.4}$$

Die gesamte Transformationsvorschrift lautet also

$$\sigma = \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}s} = \frac{1 - \kappa_\mathrm{ref}\, d}{v \cos(\psi_\mathrm{t} + \beta)}. \tag{3.5}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Zum Lösen des Optimierungsproblems mit dem direkten Solver IPOPT [11] wird das Problem diskretisiert. Die Diskretisierung entlang der Referenzlinie ist so gewählt, dass in Bereichen mit hoher Dynamik, wie in Kurven, die Stützstellen enger beieinander liegen als auf einer langen Geraden. Bisher wurden Schrittweiten im Bereich $\Delta s = 1\,\mathrm{m} \ldots 5\,\mathrm{m}$ verwendet.

4. Fahrzeugmodell und Nebenbedingungen

Die Fahrzeugdynamik wird durch eine Nebenbedingung im Optimierungsproblem abgebildet, indem die zeitlichen DGLs des Fahrzeugmodells in kontinuierlicher Zustandsraumdarstellung $\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{x})$ aufgestellt werden, anschließend gemäß (3.5) in eine wegabhängige Gleichung

$$\boldsymbol{x}' \coloneqq \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}s} = \sigma(\boldsymbol{x})\, \boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{x}) \tag{4.1}$$

transformiert und dann mit dem Euler-Verfahren diskretisiert werden, sodass sich die Form

$$\boldsymbol{0} = \boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{x}_{k+1} + h_k\, \sigma_k(\boldsymbol{x}_k)\, \boldsymbol{f}_k(\boldsymbol{u}_k, \boldsymbol{x}_k)\,, \qquad h_k \coloneqq s_{k+1} - s_k\,, \qquad k = 1, \ldots, N \tag{4.2}$$

ergibt. Die Stellgrößen $\boldsymbol{u}_k$ und die Zustände $\boldsymbol{x}_k$ stellen dabei die Optimierungsvariablen dar. Im Falle eines Rundkurses ist $\boldsymbol{x}_{N+1} \equiv \boldsymbol{x}_1$ und wird daher nicht als separate Optimierungsvariable betrachtet. Das Modell basiert auf einem nichtlinearen Einspurmodell mit 3 Freiheitsgraden und wird durch die 5 Zustände (vgl. Abbildung 1)

$$\boldsymbol{x} = [v \quad d \quad \beta \quad \psi_\mathrm{t} \quad \dot{\psi}]^\mathrm{T} \tag{4.3}$$

beschrieben. Die DGLs für d und ψ_t ergeben sich aufgrund der Kinematik:

$$\dot{d} = v \sin(\psi_\mathrm{t} + \beta) \tag{4.4}$$

$$\dot{\psi}_\mathrm{t} = \dot{\psi} - \dot{s}\, \kappa_\mathrm{ref} = \dot{\psi} - \frac{\kappa_\mathrm{ref}}{\sigma} \tag{4.5}$$

Das Fahrzeugmodell wird aus den Bewegungsgleichungen (4.6) – (4.8) [12] hergeleitet (vgl. Abbildung 2), und verwendet die üblichen Vereinfachungen, die für ein Einspurmodell gelten, z. B. Vernachlässigung der Wankdynamik.

$$0 = mv\big(\dot{\beta} + \dot{\psi}\big)\sin(\beta) - m\dot{v}\cos(\beta) + F_{\mathrm{x_r v}}\cos(\delta) + F_{\mathrm{x_r h}} - F_{\mathrm{y_r v}}\sin(\delta) - F_\mathrm{w} \tag{4.6}$$

$$0 = -mv\big(\dot{\beta} + \dot{\psi}\big)\cos(\beta) - m\dot{v}\sin(\beta) + F_{\mathrm{x_r v}}\sin(\delta) + F_{\mathrm{y_r v}}\cos(\delta) + F_{\mathrm{y_r h}} \tag{4.7}$$

$$0 = J_\mathrm{z}\ddot{\psi} - \big(F_{\mathrm{x_r v}}\sin(\delta) + F_{\mathrm{y_r v}}\cos(\delta)\big)l_\mathrm{v} + F_{\mathrm{y_r h}}l_\mathrm{h} \tag{4.8}$$

Darin ist m die Fahrzeugmasse und J_z das Trägheitsmoment um die durch den Schwerpunkt SP gehende Hochachse. F_w beschreibt die Widerstandskräfte in Längsrichtung, nämlich den Luftwiderstand F_Lx und den Steigungswiderstand für den Fahrbahnneigungswinkel γ, der zur Vereinfachung unabhängig von d und ψ_t ist:

$$F_\mathrm{w} = F_\mathrm{Lx} + mg\sin(\gamma)\,, \qquad F_\mathrm{Lx} \propto v^2 \tag{4.9}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

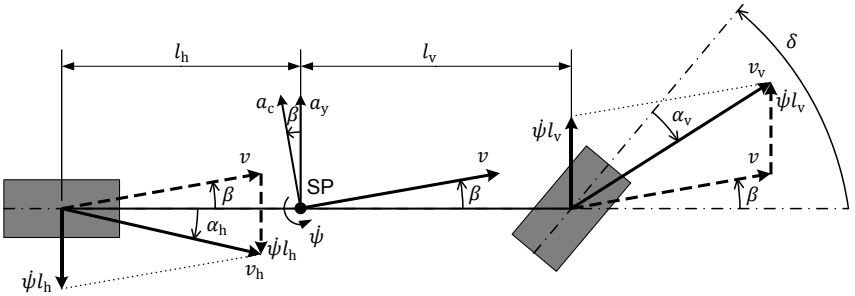


Bild 2: Benennung der Winkel beim Einspurmodell

Die verbleibenden Kräfte $F_{\mathrm{x_r}}$ und $F_{\mathrm{y_r}}$ jeweils für vorne und hinten sind die Reifenkräfte in Längsrichtung des Rades bzw. orthogonal zur Längsrichtung.

Die Querkräfte $F_{\mathrm{y_r}}(\alpha)$ werden nach einer leicht vereinfachten Form der „Magic Formula“ von Pacejka berechnet. Die Längskräfte $F_{\mathrm{x_r}}$ setzen sich aus der Antriebskraft $F_\mathrm{M} \geq 0$ und der Bremskraft $F_\mathrm{B} \leq 0$ zusammen. Sie verteilen sich über die konstanten Faktoren k_MV bzw. k_BV auf Vorder- und Hinterachse:

$$F_{\mathrm{x_r v}} = k_\mathrm{MV} F_\mathrm{M} + k_\mathrm{BV} F_\mathrm{B} \tag{4.13}$$

$$F_{\mathrm{x_r h}} = (1 - k_\mathrm{MV}) F_\mathrm{M} + (1 - k_\mathrm{BV}) F_\mathrm{B} \tag{4.14}$$

Im Gegensatz zu vielen anderen Ansätzen [3, 4, 7, 10] werden für Antrieb und Bremse separate Stellgrößen verwendet, was zwei Vorteile hat: Zum einen kann eine unterschiedliche Dynamik vorgegeben werden und zum anderen entfällt die ansonsten notwendige Verwendung der Betragsfunktion oder einer Abwandlung derselben. Dies führt zu einem verbesserten Konvergenzverhalten der Optimierung. Allerdings muss über einen zusätzlichen Term erreicht werden, dass immer eine der beiden Größen Null ist, was über

$$F_\mathrm{M} F_\mathrm{B} = 0 \tag{4.15}$$

gelingt. In der Praxis kann der Term etwas aufgeweicht werden, indem entweder eine Nebenbedingung $F_\mathrm{M} F_\mathrm{B} \geq c$ mit $c \lesssim 0$ oder eine entsprechende Straffunktion eingesetzt wird.

Insgesamt ergeben sich dann 3 Stellgrößen $\boldsymbol{u} = [F_\mathrm{M} \quad F_\mathrm{B} \quad \delta]^\mathrm{T}$, wobei F_M und F_B skaliert werden, um den Wertebereich dem des Lenkwinkels anzupassen. Die Aktordynamik für Motor, Bremse und Lenkung wird nicht im Detail modelliert, sondern nur durch jeweilige Stellratenbegrenzungen angenähert. Exemplarisch für F_M führt dies zu der Nebenbedingung

$$\frac{\Delta F_\mathrm{M}}{h_k} \leq \tilde{\sigma} \frac{F_{\mathrm{M,\,max}}}{3 T_\mathrm{M}}\,, \qquad \Delta F_\mathrm{M} = F_{\mathrm{M},k+1} - F_{\mathrm{M},k}, \tag{4.16}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

welche über $\tilde{\sigma}$ vom Zeit- in den Wegbereich transformiert wird. $\tilde{\sigma}$ ist ein fixer Schätzwert für σ und verändert sich nach wenigen Iterationen nur noch gering und kann daher ausreichend genau geschätzt werden. T_M ist die Zeitkonstante des Aktors.

Zusätzlich muss die maximale Motorleistung beachtet werden, die F_M nach oben begrenzt. Ausgehend von einem ideal schaltenden Getriebe kann die Motorleistung P_max in dem verwendeten Drehzahlbereich als konstant angenommen werden, sodass gelten muss:

$$F_\mathrm{M} \leq \frac{P_\mathrm{max}}{v} \tag{4.17}$$

Eine ganz wesentliche Beschränkung ist der KAMMSCHE KREIS (bzw. Ellipse). Er besagt, dass ein Reifen, der mit Längskraft beansprucht wird, nicht mehr die volle Querkraft aufbringen kann. Seine Beschreibung lautet für Vorder- und Hinterachse jeweils:

$$\sqrt{\left(\frac{F_{\mathrm{x_r}}}{F_{\mathrm{max,\,x_r}}}\right)^2 + \left(\frac{F_{\mathrm{y_r}}}{F_{\mathrm{max,\,y_r}}}\right)^2} \leq 1 \quad \text{mit} \quad F_{\mathrm{max,\,x_r}} = \mu_\mathrm{x} F_{\mathrm{z_r}}\,, \qquad F_{\mathrm{max,\,y_r}} = \mu_\mathrm{y} F_{\mathrm{z_r}} \tag{4.18}$$

Bei den Reifenkräften kann zusätzlich die Schwerpunkthöhe $h_\mathrm{SP} > 0$ und die Beschleunigung a_x des Schwerpunkts in Fahrzeuglängsrichtung berücksichtigt werden. Die Normalkraft $F_{\mathrm{z_r}}$ ergibt sich dann für die Vorder- bzw. Hinterachse gemäß [12] zu

$$F_{\mathrm{z_r}} = mg\frac{l_{\mathrm{h/v}}}{l}\cos(\gamma) \mp \frac{h_\mathrm{SP}}{l}(mg\sin(\gamma) + ma_\mathrm{x})\,, \qquad l = l_\mathrm{v} + l_\mathrm{h}\,, \tag{4.19}$$

wobei die Nickbewegung vernachlässigt wird. Die Längsbeschleunigung a_x führt darin zu einer komplexen Abhängigkeit von vielen Zuständen. Approximiert man sie jedoch für den Lenkwinkel $\delta = 0$, ergibt sich ausgehend vom Kräftegleichgewicht in x-Richtung

$$ma_\mathrm{x} = F_{\mathrm{x_r v}}\cos(\delta) + F_{\mathrm{y_r v}}\sin(\delta) + F_{\mathrm{x_r h}} - F_\mathrm{Lx} - mg\sin(\gamma) \tag{4.20}$$

$$\approx \underbrace{F_{\mathrm{x_r v}} + F_{\mathrm{x_r h}}}_{F_\mathrm{M} + F_\mathrm{B}} - F_\mathrm{Lx} - mg\sin(\gamma) \tag{4.21}$$

und eingesetzt in (4.19)

$$F_{\mathrm{z_r}} \approx mg\frac{l_{\mathrm{h/v}}}{l}\cos(\gamma) \mp \frac{h_\mathrm{SP}}{l}(F_\mathrm{M} + F_\mathrm{B} - F_\mathrm{Lx}). \tag{4.22}$$

(4.21) stellt für die Optimierung eine große Vereinfachung dar, die viel Rechenzeit spart.

Außerdem müssen natürlich noch einzelne Zustandsbeschränkungen eingeführt werden, insbesondere muss d auf den Bereich der Fahrbahn begrenzt werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Filterung der Referenzlinie

Wie zu Beginn beschrieben, werden alle Größen auf die Wegkoordinate s einer Referenzlinie auf der Fahrbahn bezogen. Als Referenzlinie kann prinzipiell jede Linie verwendet werden. Zu Beginn eignet sich die Mittellinie. Sie wird aus den Koordinaten der Fahrbahnränder berechnet, die per DGPS gemessen werden können. Der Krümmungsverlauf κ der Referenzlinie sollte aber möglichst glatt sein. Denn Rauschen in κ wirkt sich negativ auf das Optimierungsergebnis aus und verlangt bei der Diskretisierung eine unnötig hohe Abtastrate. Eine Tiefpass-Filterung von κ ist nicht möglich, weil dies zu signifikanten Abweichungen zum tatsächlichen Verlauf führen würde. Für eine Filterung der kartesischen Koordinaten selbst existiert aufgrund des Streckenverlaufs keine sinnvolle einheitliche Grenzfrequenz.
Deswegen wird im Folgenden eine allgemeine Methode vorgestellt, welche die 1. und 2. Ableitung der Krümmung einer beliebigen parametrierten Linie über ein quadratisches Optimierungsproblem reduziert, gleichzeitig die dazugehörigen kartesischen Koordinaten berechnet und sicherstellt, dass sie innerhalb eines vorgegebenen Bereichs liegen.

Die *resultierende* Linie wird im zweidimensionalen Raum durch die Punkte

$$[x_k \quad y_k] = \vec{r}_k = \vec{p}_k + \vec{n}_k e_k\,, \qquad k = 1, \dots, N \tag{5.1}$$

beschrieben, wobei $\vec{p}_k$ der Ortsvektor des k-ten Ausgangspunkts ist, $\vec{n}_k$ der Normalenvektor an diesem Punkt und e_k die Verschiebung des Punktes $\vec{p}_k$ darstellt. Jeder Punkt kann also nur in Richtung seines Normalenvektors verschoben werden. Dieser lässt sich aus einer Spline-Interpolation einfach bestimmen.
Wird die Linie so parametriert, dass der Parameter s_k gerade die Weglänge bis zum k-ten Punkt beschreibt, berechnet sich die Krümmung durch

$$\kappa(s_k) = x^{(1)}(s_k)\, y^{(2)}(s_k) - x^{(2)}(s_k)\, y^{(1)}(s_k) \quad \text{für} \quad \vec{r}(s_k) \equiv \vec{r}_k. \tag{5.2}$$

Würde man nun $\kappa^{(1)}$ und $\kappa^{(2)}$ minimieren, entstünde ein komplexes nichtlineares Problem. Statt dessen werden nur die wesentlichen Bestandteile der Terme, nämlich $x^{(2)}$, $x^{(3)}$ und $x^{(4)}$ sowie y_k, $y^{(3)}$ und $y^{(4)}$ über Differenzenquotienten berechnet, anschließend quadriert und über alle k summiert. Zusätzlich wird auch die quadrierte Verschiebung e_k^2 in jedem Punkt minimiert. Mit den Optimierungsvariablen $\boldsymbol{x}_{\mathrm{opt}} = [e_1 \dots \; e_N \quad x_1 \dots x_N \quad y_1 \dots \, y_N]^{\mathrm{T}}$ kann das Gütemaß in quadratischer Form $J = \boldsymbol{x}_{\mathrm{opt}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q} \boldsymbol{x}_{\mathrm{opt}}$ formuliert werden sowie Gleichung (5.1) als lineare Nebenbedingung der Form $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_{\mathrm{opt}} = \boldsymbol{b}$ mit $\boldsymbol{b} = [p_{\mathrm{x},1} \cdots \; p_{\mathrm{x},N} \quad p_{\mathrm{y},1} \cdots \; p_{\mathrm{y},N}]^{\mathrm{T}}$. Über eine einfache Beschränkung der Form $\boldsymbol{e}_{\min} \leq \boldsymbol{x}_{\mathrm{opt}} \leq \boldsymbol{e}_{\max}$ kann der zulässige Bereich begrenzt werden, in dem die Ausgangspunkte $\vec{p}_k$ verschoben werden dürfen. Auch eine asymmetrische Verschiebung ist einfach zu realisieren. Sowohl durch diese Flexibilität als

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

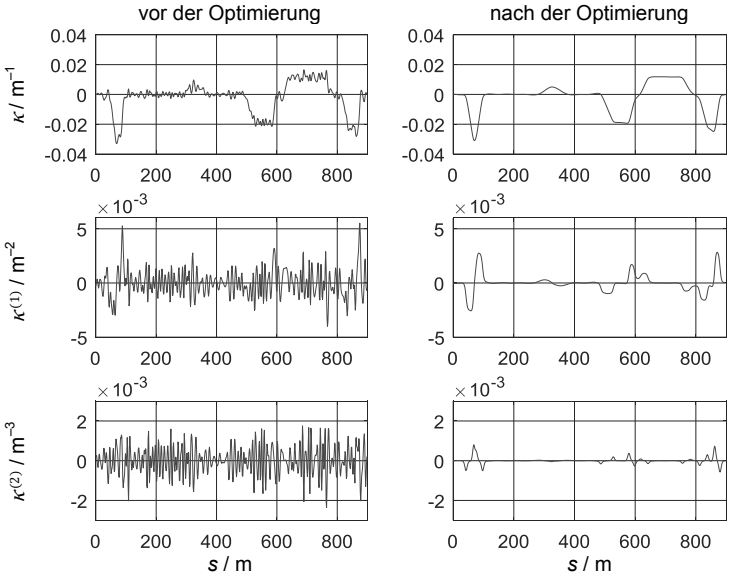


Bild 3: Ergebnisse der Optimierung zum Glätten des Krümmungsverlaufs

auch durch die Berücksichtigung der höheren Ableitungen führt diese Methode zu weit besseren Ergebnissen als beispielsweise Regressions-Splines.

Abbildung 3 zeigt den deutlich geglätteten Krümmungsverlauf. Dort beträgt die maximale Verschiebung $e_{\max} = \pm 15\ \mathrm{cm}$ und die mittlere betragsmäßige Verschiebung $\overline{|e|} \approx 7\ \mathrm{cm}$.

6. Ergebnisse

Um das Optimierungsproblem schnell lösen zu können, werden alle Ableitungen, die Ipopt [11] verwendet, also der Gradient der Gütefunktion, die JACOBY-Matrix der Beschränkungen und die HESSE-Matrix der LAGRANGE-Funktion, algebraisch berechnet und möglichst effizient implementiert. So muss Ipopt die Hesse-Matrix nicht über ein Quasi-Newton-Verfahren approximieren, um die Suchrichtung zu bestimmen. Die Trajektorienplanung wurde für zwei Rennstrecken durchgeführt und dort getestet. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die Anzahl der Iterationen in Ipopt sowie die simulierten Rundenzeiten für ein Fahrzeug der Kompakt-Klasse mit $P_{\max} = 110\ \mathrm{kW}$ und Frontantrieb. Die aufgeführte Rechenzeit wurde mit MATLAB auf einem Intel i7-3740QM mit 2,7 GHz benötigt und ist der von Ipopt intern ermittelte Wert. Um die Ergebnisse gut vergleichen zu können, werden als

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 1: Rechenzeit der Optimierung (Mittelwert über je 3 Optimierungen)

Strecke		**Teststrecke 1**		**Teststrecke 2**	
Länge (Mittellinie)	S_{ref} / m	4508,7		4216,0	
Abtastpunkte	N_{ref}	1288		1255	
Schrittweite	h / m	1,8 … 4,0		1,25 … 4,0	
relative Toleranz [11]	ϵ	10^{-5}	10^{-7}	10^{-5}	10^{-7}
simulierte Rundenzeit	T_{lap} / s	139,071	139,075	126,998	126,994
Anzahl Iterationen	N_{lpopt}	33	41	36	52
CPU-Zeit	T_{CPU} / s	1,58	1,95	1,62	2,52

Startwerte für die Optimierung alle Optimierungsvariablen auf null gesetzt, mit Ausnahme der Geschwindigkeit, die $v_{k,\,\mathrm{start}} = v_{\min} = \mathrm{const} > 0$ ist.

Abbildung 4 zeigt die berechnete Rennlinie für die Teststrecke 1. Die Markierungen auf der Strecke geben die Weglänge s der Referenzlinie an. In Abbildung 5 (oben) sind das Geschwindigkeitsprofil v, die Krümmung κ von Referenzlinie und Rennlinie sowie die 3 Stellgrößen Motorkraft F_{M}, Bremskraft F_{B} und Lenkwinkel δ zu sehen. Zusätzlich ist im letzten Diagramm der Schwimmwinkel β dargestellt. Unten links ist die Reifenkraft im Kammschen Kreis für die Vorderachse dargestellt. Daneben ist die Beschleunigung im

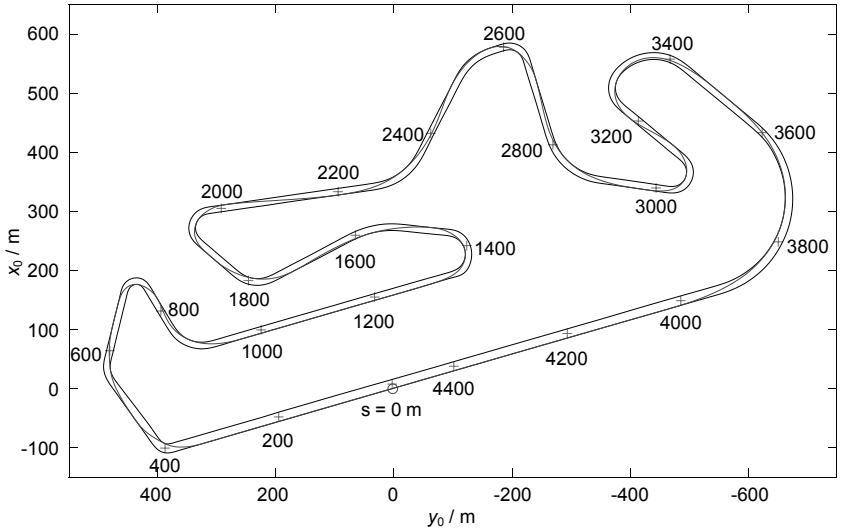


Bild 4: Rennlinie für Teststrecke 1 (der Kreis bei s = 0 m ist der Startpunkt)

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

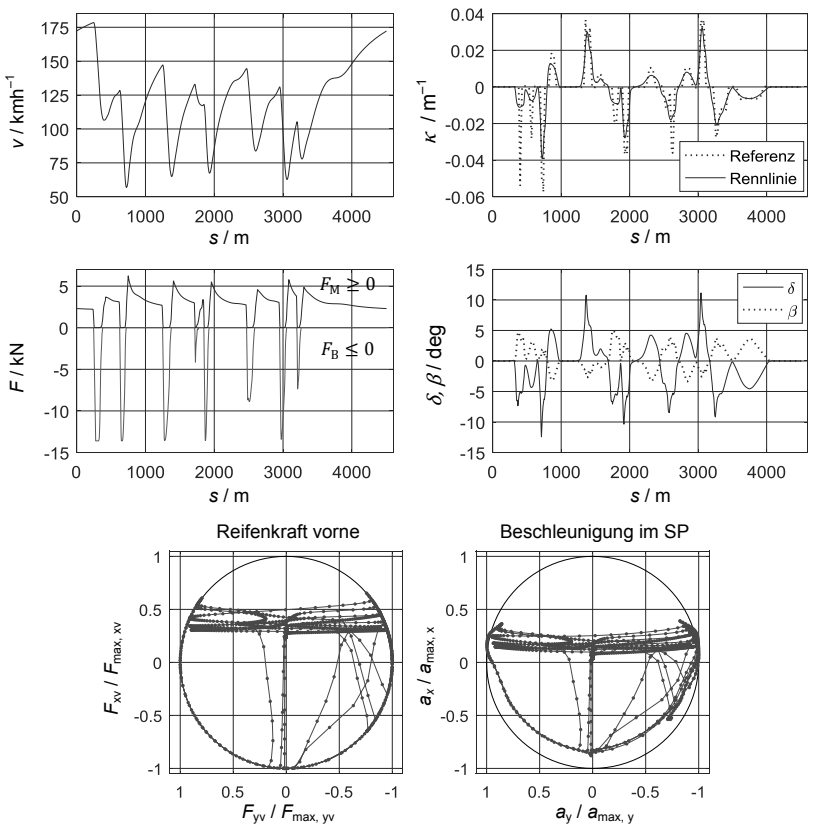


Bild 5: Ergebnisse der Optimierung für die Teststrecke 1

Schwerpunkt bezogen auf $a_{\max} = \frac{\mu F_z}{m}$ abgebildet. Man sieht, dass die Werte nicht auf dem Einheitskreis liegen. Würde man die Rennlinie anhand einer Punktmasse so auslegen, dass die Beschleunigung am Limit liegt, entstünden Reifenkräfte, die nicht mehr aufgebracht werden könnten.

7. Fazit

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz vorgestellt, mit dem eine modellbasierte Rennlinienberechnung in wenigen Sekunden durchzuführen ist. Dafür wurde eine mathematische Streckenbeschreibung erstellt, die es gleichzeitig erlaubt, eine Transformation vom Zeit- in den Wegbereich durchzuführen. Als Modell dient ein nichtlineares Einspurmodell mit

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

nichtlinearer Reifenkennlinie. Außerdem wurde eine Methode zur Filterung parametrierter Linien vorgestellt, die zur Aufbereitung gemessener Streckendaten verwendet wird. Die Optimierungsergebnisse zeigen einen plausiblen Verlauf der berechneten Rennlinie.

Literaturangaben

[1] Siegler, B., Deakin, A. u. Crolla, D.: Lap Time Simulation: Comparison of Steady State, Quasi-Static and Transient Racing Car Cornering Strategies. Motorsports Engineering Conference & Exposition. SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States 2000

[2] Gadola, M., Vetturi, D., Cambiaghi, D. u. Manzo, L.: A Tool for Lap Time Simulation. Motorsports Engineering Conference & Exposition. SAE Technical Paper Series. Warrendale, PA, United States: SAE International400 Commonwealth Drive 1996

[3] Hendrikx, J. P. M., Meijlink, T. J. J. u. Kriens, R. F. C.: Application of Optimal Control Theory to Inverse Simulation of Car Handling. Vehicle System Dynamics 26 (1996) 6, S. 449–461

[4] Casanova, D.: On Minimum Time Vehicle Manoeuvring. The Theoretical Optimal Lap, Cranfield University PhD Thesis. Cranfield 2000

[5] Kelly, D. P.: Lap time simulation with transient vehicle and tyre dynamics, Cranfield University Diss. Cranfield 2008

[6] Perantoni, G. u. Limebeer, D. J. N.: Optimal control for a Formula One car with variable parameters. Vehicle System Dynamics 52 (2013) 5, S. 653–678

[7] Timings, J. P. u. Cole, D. J.: Minimum Maneuver Time Calculation Using Convex Optimization. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 135 (2013) 3, 31015-1–31015-9

[8] Brayshaw, D.: The use of numerical optimisation to determine on-limit handling behaviour of race cars, Cranfield University Diss. Cranfield 2004

[9] Kapania, N. R.: Trajectory planning and control for an autonomous race vehicle, Stanford University Diss. Stanford 2016

[10] Gerdts, M., Karrenberg, S., Müller-Beßler, B. u. Stock, G.: Generating locally optimal trajectories for an automatically driven car. Optim. and Engin. 10 (2009) 4, S. 439–463

[11] Wächter, A. u. Biegler, L. T.: On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. Mathematical Programming 106 (2006) 1, S. 25–57

[12] Mitschke, M. u. Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Kombinierte Längs- und Quertrajektorienplanung für automatisierte Fahrstreifenwechsel

Combined Longitudinal and Lateral Trajectory Planning for Automated Lane Changes

Dipl.-Ing. **Tim Hansen**, Prof. Dr.-Ing. **Ulrich Konigorski**,
TU Darmstadt - Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik;
Michael Schulz, M.Sc., Dr.-Ing. **Michael Knoop**,
Robert Bosch GmbH - Chassis Systems Control

Kurzfassung

Beschrieben wird ein Verfahren zur kombinierten Planung von Längs- und Quertrajektorien für automatisierte Fahrstreifenwechsel auf der Autobahn. Um auf das sich verändernde Umfeld reagieren zu können, findet eine zyklische Neuplanung der Trajektorie statt. Durch die vergleichsweise geringe Rechenzeit des Verfahrens kann dies in Echtzeit im Fahrzeug durchgeführt werden. Die Planung ermöglicht Trajektorien, bei denen die Querbewegung des Fahrzeugs erst zu einem späteren Zeitpunkt einsetzt. Das Fahrzeug muss sich daher nicht auf Höhe der Ziellücke befinden, sondern kann auch die Anfahrt zu dieser Lücke planen. Die Trajektorie ist das Ergebnis einer Optimierung. Als Ansatz für Längs- und Quertrajektorie wird je ein Spline mit 15 Polynomen 3. Grades gewählt. Das System ermöglicht auch einen Abbruch des Fahrstreifenwechsels, da in jedem Zeitschritt eine Abbruchtrajektorie berechnet wird, auf welche umgeschaltet werden kann. Das Verfahren wurde in der Simulation getestet, in einem Versuchsträger implementiert und unter realen Bedingungen in unterschiedlichen Szenarien erprobt. Die sich dabei ergebenden Trajektorien wurden von den Fahrern als komfortabel beschrieben.

Abstract

This paper describes a system for combined longitudinal and lateral trajectory planning for automated lane changes on motorways. To adapt to the changing environment, a cyclic replanning takes place. The relatively low computation time of the described method allows it to be computed in the vehicle in realtime. The approach allows trajectories where the lateral movement starts at a later time. The vehicle does not need to be beside the desired gap, but can rather plan the motion towards this gap. The trajectory is the result of an optimisation

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

problem. To represent the longitudinal and lateral trajectory two splines consisting of 15 cubic polynomials are used. The system allows aborting the lane change manoeuvre by continuously planning an abort trajectory to which can be switched over. The approach was tested in simulation, was implemented in an experimental vehicle and was tested under real world conditions in different scenarios. The drivers described the resulting trajectories as comfortable.

1. Motivation

Fahrstreifenwechsel werden sowohl bei langsamen Geschwindigkeiten (innerorts, Stausituationen) als auch bei hohen Geschwindigkeiten (Autobahn) durchgeführt. Diese Arbeit, die im Rahmen einer Kooperation zwischen der TU Darmstadt und der Robert Bosch GmbH durchgeführt wurde, fokussiert sich auf Fahrstreifenwechsel auf Autobahnen.

Bei einfachen Systemen zum automatisierten Fahrstreifenwechsel wird lediglich eine weitgehend vordefinierte Quertrajektorie abgefahren. Es wird geprüft, ob ein ausreichend großer Bereich auf dem Zielfahrstreifen frei ist. Sofern dies der Fall ist, kann der Fahrstreifenwechsel gestartet werden. Bereits 1994 konnte somit auch ein Fahrzeug vorgestellt werden, das den Fahrstreifenwechsel eigenständig durchführt [1] [2].

Bei neueren Systemen findet neben der Planung der Quertrajektorie auch eine Planung der Längstrajektorie statt. Aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Umfeldfahrzeuge ist es sinnvoll, eine Trajektorienplanung $(x(t), y(t))$ anstatt einer Bahnplanung $y(x)$ durchzuführen. In einigen Arbeiten wird dabei die Längs- und Quertrajektorie weitgehend getrennt nacheinander geplant [3].

Je nach gewählter Längstrajektorie steht für die Querbewegung unterschiedlich viel Zeit zur Verfügung. Daher ist es sinnvoll, Längs- und Quertrajektorie gemeinsam zu planen. Bei derartigen Verfahren ist die Trajektorie häufig Ergebnis eines nichtlinearen Optimierungsproblems. Für die Trajektorie wird ein parameterbasierter Ansatz gewählt. Ein Optimierungsalgorithmus bestimmt die Parameter, die notwendig sind, um eine vorher definierte Gütefunktion zu minimieren. Bei zyklischer Neuplanung entspricht dies im Wesentlichen einer modellprädiktiven Regelung. Die Verfahren unterscheiden sich in den gewählten Trajektorienansätzen, den Optimierungsalgorithmen und der Gütefunktion.

In den Arbeiten [4] und [5] wird als Ansatz je ein Polynom in Längs- und Querrichtung gewählt. Für eine diskrete Menge an Endzuständen wird die Güte aller möglichen Trajektorien bestimmt und die beste ausgewählt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In [6] wurde vom Autor ein Verfahren vorgestellt, bei dem die Längstrajektorie aus zwei Polynomen fünften Grades besteht, die über drei Parameter definiert sind. Die Quertrajektorie leitet sich indirekt aus der Längstrajektorie ab. Der Downhill-Simplex-Algorithmus wird verwendet, um die Parameter zu bestimmen, die zu einer optimalen Gesamttrajektorie führen. Durch diesen Ansatz kann der Fahrstreifenwechsel frühzeitig geplant und eingeleitet werden.

Die vorliegende Arbeit baut auf den darin gewonnen Erkenntnissen auf. Durch mehr Freiheitsgrade der Trajektorie wird das Ziel verfolgt, die Beschleunigungsmöglichkeiten des Fahrzeugs besser auszunutzen und komplexere Szenarien abdecken zu können.

2. Aufbau des Systems

Mit Hilfe der Kamerainformationen und den Daten über Geschwindigkeit und Schwimmwinkel wird ein Straßenkoordinatensystem erzeugt, in dem die Planung der Trajektorie stattfindet. Die x-Achse des Straßenkoordinatensystems verläuft parallel zu den Fahrstreifenmarkierungen, die y-Achse steht senkrecht darauf in Fahrtrichtung nach links.

Die Daten der einzelnen Radarsensoren werden fusioniert und die Position der Umfeldfahrzeuge wird in das Straßenkoordinatensystem transformiert. Für jedes Fahrzeug wird bestimmt, welche Fahrstreifen sie befahren. Fahrstreifen werden dabei über ihre komplette Breite als belegt betrachtet.

Das System besteht aus der eigentlichen Trajektorienplanung sowie einer unterlagerten Regelung (Bild 1). Die Trajektorienplanung berechnet zyklisch alle $200\ \mathrm{ms}$ eine abzufahrende Trajektorie. Die unterlagerte Regelung sorgt dafür, dass das Fahrzeug dieser folgt. Sie wird alle $20\ \mathrm{ms}$ auf einer Echtzeithardware berechnet.

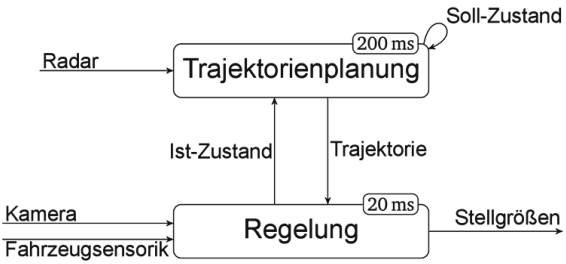


Bild 1: Systemaufbau

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Beim Aktivieren des Systems wird als Startzustand für die Planung der Ist-Zustand des Fahrzeugs übernommen. Bei den nachfolgenden Planungsschritten wird dafür der Sollzustand der Trajektorienplanung verwendet. Dies sorgt für einen stetigen Verlauf des ausgegebenen Sollgrößenverlaufs und vermeidet Hundekurven (sich zuziehende Kurven) wie sie in [4 S. 6] beschrieben werden. Bei größeren Störungen oder wenn das System vom Fahrer übersteuert wird, wird der Startzustand entsprechend angepasst.

Das System plant Trajektorien für bis zu sieben Lücken zwischen den Fahrzeugen (Bild 2). Je nach Fahrerwunsch und Trajektoriengüte kann dann die geeignetste Trajektorie ausgewählt werden. Durch die Planung für mehrere Lücken wird automatisch auch eine Abbruchtrajektorie mitgeplant, auf die bei Bedarf umgeschaltet werden kann.

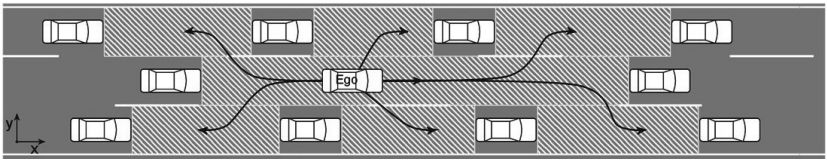


Bild 2: Mehrere Lücken pro Fahrstreifen

Bei der Planung der Trajektorie für eine Lücke kann das Umfeld auf vier Fahrzeuge reduziert werden (Bild 3). Die Fahrzeuge ergeben sich aus der Lückenbegrenzung auf Start- und Zielfahrstreifen. Sie werden wie folgt benannt:

TD	Tail Destination lane	FD	Front Destination lane
TS	Tail Start lane	FS	Front Start lane

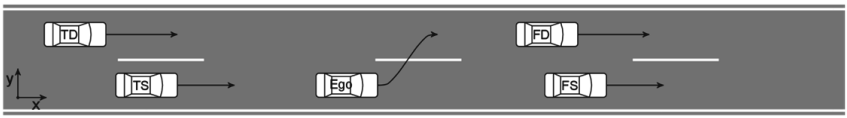


Bild 3: Namen der Umfeldfahrzeuge für die Planung der Trajektorie in eine Lücke

3. Das Konzept der Trajektorienplanung

Auch in dieser Arbeit wird ein Ansatz verfolgt, bei dem die Trajektorie das Ergebnis eines nichtlinearen Optimierungsproblems ist. Die Trajektorie ist abhängig von einer Reihe an Parametern. Eine Gütefunktion weist jeder Trajektorie bzw. ihren Parametern eine Güte zu. Die

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

optimalen Parameter für die Trajektorie werden mit einem iterativen, gradientenbasierten Optimierungsalgorithmus bestimmt.

Als Ansatz für die Trajektorie wird je ein Spline in Längs- und in Querrichtung verwendet. Beide Splines setzen sich zusammen aus je $n = 15$ Polynomsegmenten dritten Grades mit einer zeitlichen Länge von $T = 1\,\mathrm{s}$. Es wird ein stetiger Übergang der Größen Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung gefordert (Bild 4). Werden die hierdurch entstehenden Nebenbedingungen entsprechend eingesetzt, ergibt sich pro Richtung und Segment ein freier Parameter. In diesem Fall wurde dafür der Ruck gewählt. Es lässt sich zeigen, dass sich die Polynomkoeffizienten mit Hilfe einer Matrixmultiplikation aus dem Ruckvektor $\mathbf{j}$ ergeben. Für die Polynomkoeffizienten $\mathbf{p}_i$ des Segmentes i gilt beispielsweise

$$\underline{\mathbf{p}}_i = \underline{\mathbf{D}}_i \bullet \underline{\mathbf{x}}_0 + \underline{\mathbf{E}}_i \bullet \underline{\mathbf{j}}$$

mit den konstanten Matrizen $\underline{\mathbf{D}}_i$ und $\underline{\mathbf{E}}_i$ sowie dem Anfangszustand

$$\underline{\mathbf{x}}_0 = [p_0 \quad v_0 \quad a_0 \quad j_0]^{\mathrm{T}}.$$

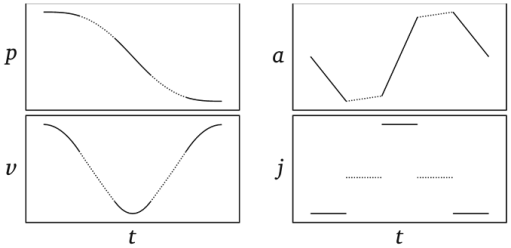


Bild 4: Beispielhafter Verlauf der Größen Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck bei einer Querbewegung unter Verwendung eines Splines dritten Grades mit fünf Segmenten. Zur Trajektorienplanung wurden in dieser Arbeit immer 15 Segmente verwendet.

4. Gütemaß

Der verwendete Optimierungsalgorithmus nutzt den analytisch berechneten Gradienten. Aus diesem Grund ist das gesamte Gütemaß so aufgebaut, dass es einmal stetig differenzierbar ist. Das Gütemaß setzt sich aus einigen Teilkomponenten zusammen, die im Folgenden beschrieben werden.

Die Komponenten, die sich auf den Komfort beziehen, haben die Form:

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$J_{\mathrm{K}} = \int_0^{nT} \left[\underline{\mathbf{x}}^{\mathrm{T}}(t)\underline{\mathbf{W}}_{\mathrm{K}}\underline{\mathbf{x}}(t)\right]\mathrm{d}t$$

Hierbei steht $\underline{\mathbf{x}} = [p \quad v \quad a \quad j]^{\mathrm{T}}$ für den Zustandsvektor des Systems und $\underline{\mathbf{W}}_{\mathrm{K}}$ für eine diagonale Gewichtungsmatrix. Diese lässt sich zusammen mit einer Endpunktbewertung

$$J_{\mathrm{E}} = \left(\underline{\mathbf{x}}(nT) - \underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{e}}\right)^{T} \bullet \underline{\mathbf{W}}_{\mathrm{e}} \bullet \left(\underline{\mathbf{x}}(nT) - \underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{e}}\right)$$

in die Form

$$\boldsymbol{J}_{\mathbf{K,E}} = \underline{\mathbf{x}}_{\mathbf{0}}^{\mathbf{T}}\underline{\mathbf{W}}_{\mathbf{1}}\underline{\mathbf{x}}_{\mathbf{0}} + \underline{\mathbf{x}}_{\mathbf{0}}^{\mathbf{T}}\underline{\mathbf{W}}_{\mathbf{2}}\underline{\mathbf{j}} + \underline{\mathbf{x}}_{\mathbf{e}}^{\mathbf{T}}\underline{\mathbf{W}}_{\mathbf{3}}\underline{\mathbf{j}} + \underline{\mathbf{x}}_{\mathbf{e}}\underline{\mathbf{W}}_{\mathbf{4}}\underline{\mathbf{x}}_{\mathbf{0}} + \underline{\mathbf{j}}^{\mathbf{T}}\underline{\mathbf{W}}_{\mathbf{5}}\underline{\mathbf{j}} + \underline{\mathbf{x}}_{\mathbf{e}}^{\mathbf{T}}\underline{\mathbf{W}}_{\mathbf{6}}\underline{\mathbf{x}}_{\mathbf{e}}$$

bringen, welche neben $\underline{\mathbf{x}}_0$ und dem Soll-Endzustand $\underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{e}}$ nur vom Ruck $\underline{\mathbf{j}}$ abhängt. Diese Art der Endpunktbewertung wird bei der Quertrajektorie genutzt, um den Endpunkt auf dem Zielfahrstreifen vorzugeben.

Die weiteren Teilkomponenten basieren auf der abgetasteten bzw. diskretisierten Trajektorie. Hierfür werden zwei Abtastpunkte pro Segment, also insgesamt 30 verwendet. Auch die Abtastung lässt sich als Matrixmultiplikation darstellen. Für die Abtastwerte $\underline{\mathbf{s}}_{\mathrm{p}}$ der Position ergibt sich mit den beiden konstanten Matrizen $\underline{\mathbf{L}}_{\mathrm{p}}$ und $\underline{\mathbf{M}}_{\mathrm{p}}$ beispielsweise:

$$\underline{\mathbf{s}}_{\mathbf{p}} = \underline{\mathbf{L}}_{\mathbf{p}}\underline{\mathbf{x}}_{\mathbf{0}} + \underline{\mathbf{M}}_{\mathbf{p}}\underline{\mathbf{j}}$$

So lässt sich auch der Gradient bezüglich der Abtastpunkte wieder auf die eigentlichen Parameter $\underline{\mathbf{j}}$ des Splines umrechnen:

$$\frac{\mathrm{d}J}{\mathrm{d}\underline{\mathbf{j}}} = \frac{\mathrm{d}J}{\mathrm{d}\underline{\mathbf{s}}_{\mathrm{p}}} \bullet \underline{\mathbf{M}}_{\mathrm{p}}$$

Auf diese Weise erhält man zwei Splines (Längs und Quer) mit 30 Abtastpunkten die sich mittels $2 \bullet 15 = 30$ Variablen parametrieren lassen.

5. Auf den Abtastpunkten basierende Gütefunktion

Im Weiteren werden die einzelnen Komponenten der auf den Abtastpunkten basierenden Gütefunktion beschrieben. In vielen Fällen sind diese abschnittsweise mit Hilfe von Polynomen zweiten Grades so definiert, dass sie einmal stetig differenzierbar sind. Hierbei wird für jede Komponente ... jeweils ein Potenzial $p_{\ldots}(\underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{Lon}}, \underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{Lat}})$ definiert, woraus sich die Gütefunktion

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$J_{\dots} = \int_0^{nT} [p_{\dots}(\underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{Lon}}, \underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{Lat}})]\mathrm{d}t$$

ergibt. Für die Berechnung dieser Funktion wird das Integral auf Basis der Abtastpunkte approximiert.

Für die Bewertung ist es notwendig, eine Annahme über das Verhalten der Umfeldfahrzeuge zu treffen. Für die Fahrzeuge wird neben der Geschwindigkeit auch die geschätzte Beschleunigung berücksichtigt. Dabei wird angenommen, dass die Beschleunigung langsam abklingt. Die rückwärtigen Fahrzeuge werden mit Hilfe des Intelligent-Driver-Modells so prädiziert, dass sie einen gewissen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug nach Möglichkeit nicht unterschreiten.

Potenzial $\mathbf{p_{AC}}$ zur Kollisionsvermeidung

Zur Vermeidung von Kollisionen wird ein Bereich um die Umfeldfahrzeuge definiert, der nicht befahren werden darf. Die Ausdehnung jedes Bereiches ist dabei abhängig von der Geschwindigkeit des jeweiligen Umfeldfahrzeuges und orientiert sich in Querrichtung an der Lage der Fahrstreifenmarkierungen. Ein Eindringen des eigenen Fahrzeugs in diesen Bereich wird quadratisch in x- und y-Richtung bestraft. Zusätzlich wird auch die Annäherung bzw. das Befahren anderer Fahrstreifen quadratisch bestraft.

$$p_{\mathrm{AC}} = f_{\mathrm{AC,Lanes}}(\underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{Lat}}) + \sum_{C=\{\mathrm{FS,FD,TS,TD}\}} \left[f_{\mathrm{AC,Lon},C}(\underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{Lon}}) \bullet f_{\mathrm{AC,Lat},C}(\underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{Lat}})\right]$$

Potenzial p_{SA} zur Einhaltung der Sicherheitsabstände

Neben der reinen Kollisionsvermeidung sollen während der stationären Fahrt auch die Sicherheitsabstände eingehalten werden. Hierfür sorgt eine zweite Potenzialfunktion mit größeren Bereichen. Sie setzt sich aus drei multiplikativen Komponenten zusammen: Bewertung $f_{\mathrm{SA,Lon,\dots}}$ der longitudinalen Eindringtiefe, Fahrstreifenbelegungsfunktion $f_{\mathrm{SA,Lat,\dots}}$ in Querrichtung sowie einer Funktion $f_{\mathrm{SA,vrel}}$ zur Berücksichtigung der Relativgeschwindigkeit v_{rel} gegenüber den vorderen Fahrzeugen (Bild 5).

$$p_{\mathrm{SA}} = \sum_{C=\{\mathrm{FS,FD}\}} \left[f_{\mathrm{SA,Lon},C}(\underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{Lon}}) \bullet f_{\mathrm{SA,Lat},C}(\underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{Lat}}) \bullet f_{\mathrm{SA,vrel},C}(\underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{Lon}})\right] + \sum_{C=\{\mathrm{TS,TD}\}} \left[f_{\mathrm{SA,Lon},C}(\underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{Lon}}) \bullet f_{\mathrm{SA,Lat},C}(\underline{\mathbf{x}}_{\mathrm{Lat}})\right]$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Eindringtiefe wird in $f_{\mathrm{SA,Lon}}$ wieder quadratisch gewichtet. Die Fahrstreifenbelegungsfunktion $f_{\mathrm{SA,Lat}}$ berücksichtigt, ob der entsprechende Fahrstreifen befahren wird. Sie weist für eine Fahrt in der Mitte eines Fahrstreifens keine Querpositionsabhängigkeit auf. Auf diese Weise kommt es zu keiner Ausweichbewegung bei einer Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs.

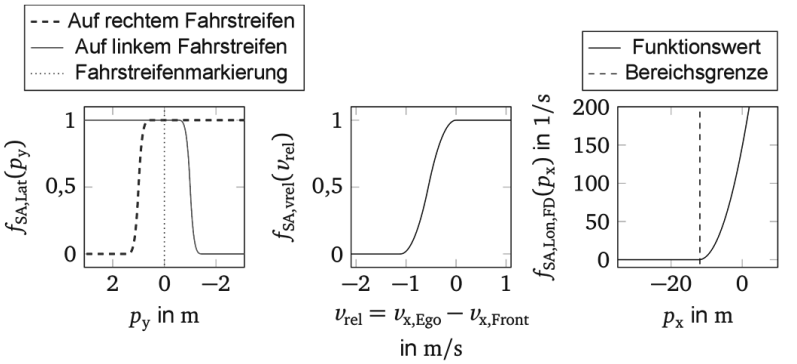


Bild 5: Teilfunktionen des Potenzials zur Einhaltung der Sicherheitsabstände

Potenzial p_{FS} zur Berücksichtigung der Fahrstreifen

Das Fahrstreifenpotenzial hat zwei Aufgaben. Zum Ersten soll ein zügiger Wechsel auf den Zielfahrstreifen realisiert werden, zum Zweiten soll nicht unnötig lange zwischen den beiden Fahrstreifen gefahren werden. Das dafür verwendete Potenzial ist in Bild 6 abgebildet und setzt sich aus Polynomen zweiten Grades zusammen.

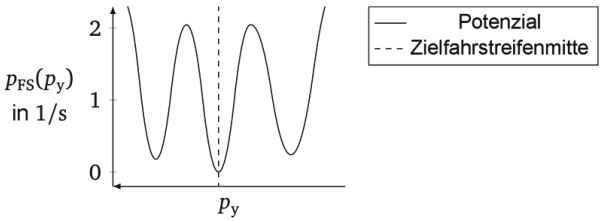


Bild 6: Fahrstreifenpotenzialfunktion

Es passt sich in seiner Form den unterschiedlich breiten Fahrstreifen an. Durch die in Abschnitt 4 beschriebene Endpunktbewertung in Querrichtung wird sichergestellt, dass sich der

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Endpunkt der Trajektorie auf dem Zielfahrstreifen befindet. Zur Vermeidung von Nebenminima wird für die Approximation des Integrals ein spezielles Verfahren verwendet. Dabei wird die Trajektorie zwischen den Abtastpunkten mit einem linearen Verlauf approximiert. Für diesen Verlauf kann das Integral anschließend analytisch mit Hilfe der Stammfunktion des Fahrstreifenpotenzials berechnet werden.

Werden die Potentialfunktionen für Kollisionsvermeidung, Einhaltung der Sicherheitsabstände sowie das Fahrstreifenpotenzial addiert, so erhält man ein Summenpotenzial. Dies ist für ein Beispielszenario in Bild 7 dargestellt.

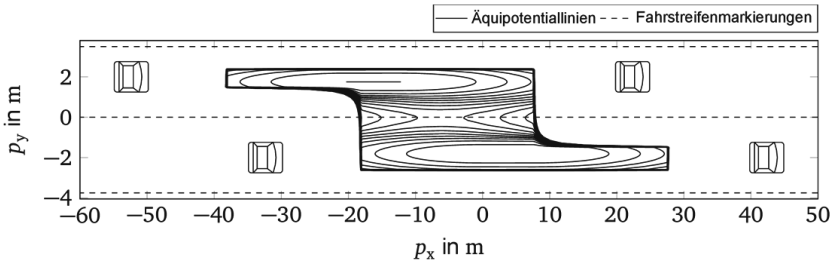


Bild 7: Beispielhaftes Summenpotenzial bestehend aus den drei Teilen: Einhaltung der Sicherheitsabstände, Kollisionsvermeidung und Fahrstreifenpotenzial. Dargestellt sind die Äquipotenziallinien zusammen mit den relevanten Umfeldfahrzeugen. (Annahme $v_{\mathrm{rel}} = 0$)

Potenzial zur Beschränkung der Trajektoriendynamik

Um sicherzustellen, dass das Fahrzeug in der Lage ist, der Trajektorie zu folgen, muss deren Dynamik begrenzt werden. Hierzu werden Geschwindigkeit und Beschleunigung in Längs- sowie Querrichtung mit Schwellwerten verglichen und deren Übertretung quadratisch bestraft. Besonders zu beachten ist hierbei die Maximalbeschleunigung, die eine Geschwindigkeitsabhängigkeit aufweist. So entstehen keine zusätzlichen Nebenbedingungen im Optimierungsproblem.

Bewertung der Endsituation

Für eine vorausschauende und plausible Fahrweise ist die Bewertung des Trajektorienendpunktes in Längsrichtung besonders relevant. Durch eine Belohnung der Längsposition und -geschwindigkeit wird ein zügiges Erreichen der Wunschgeschwindigkeit erreicht. Um sich einem Fahrzeug aber nicht mit unnötig hoher Geschwindigkeit zu nähern, geht die überschüssige Energie am Endpunkt in das Gütekriterium ein. Dazu wird die Geschwindigkeit

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

bestimmt, die am Endpunkt notwendig ist, um nach einem Ausrollvorgang genau im gewünschten Abstand und mit der gleichen Geschwindigkeit dem vorausfahrenden Fahrzeug zu folgen. Aus der Differenz zur Endpunktgeschwindigkeit lässt sich die überschüssige Energie bestimmen. An Stellen, an denen die Ableitung der Gütefunktion Unstetigkeiten aufweist, wurden weiche Übergänge eingefügt.

7. Bestimmung der optimalen Trajektorie

Die Gesamtgütefunktion setzt sich aus den oben beschriebenen Teilen zusammen:

- Komfort in Längs- und Querrichtung
- Kollisionsvermeidung
- Einhaltung der Sicherheitsabstände
- Fahrstreifenpotenzial
- Beschränkung der Trajektoriendynamik
- Endpunktbewertung in Längs- und Querrichtung

Diese Teile werden gewichtet addiert und der Gradient bezüglich der Optimierungsvariablen bestimmt. Die optimale Trajektorie wird mit Hilfe des Limited-Memory Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno Algorithmus (LBFGS) iterativ bestimmt. Hierzu wurde auf die OpenSource Matlab-Implementierung minFunc von Mark Schmidt [7] zurückgegriffen. Sofern im letzten Planungsschritt schon eine Trajektorie geplant wurde, wird diese als Startwert für die aktuelle Planung verwendet.

8 Ergebnisse

Bild 8 zeigt die geplante Trajektorie in Längs- und Querrichtung für einen beispielhaften Fahrstreifenwechsel nach links zwischen zwei schneller fahrenden Fahrzeugen. Aufgetragen ist hierbei, aus Gründen der Übersichtlichkeit, die Relativposition bezüglich eines bewegten Beobachters ($p_{\mathrm{x,rel}}(t) = p_{\mathrm{x}}(t) - t \bullet v_{\mathrm{Beobachter}}$). Wie erkennbar ist, beschleunigt das Fahrzeug schon vor dem Erreichen der Lücke, um zwischen den deutlich schnelleren Fahrzeugen auf dem Zielfahrstreifen einfädeln zu können.

Die Trajektorienplanung wurde in der Simulation und einem realen Versuchsträger umgesetzt. Der Versuchsträger wurde sowohl in gestellten Szenarien auf einem Testgelände als auch im realen Straßenverkehr getestet. Dabei hat sich gezeigt, dass das System in der Lage ist, auch in dichtem Verkehr einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Im Vergleich zur in [6] vorgestellten Variante wird zwar etwas mehr Rechenzeit benötigt, das System ist dafür

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

aber in der Lage, die Beschleunigungsmöglichkeiten des Fahrzeugs besser auszunutzen. Bei beiden Varianten wurden die Fahrstreifenwechsel von den Fahrern als komfortabel und sehr angenehm beschrieben. Zur besseren Beurteilung des Fahrverhaltens sei auf die unter [9] verfügbaren Videos verwiesen.

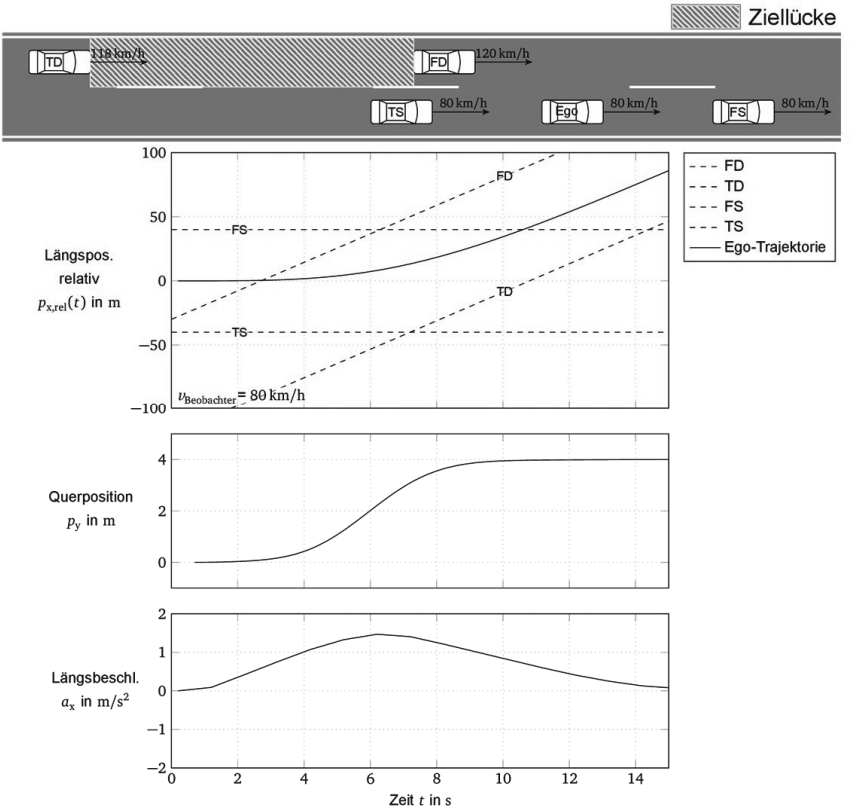


Bild 8: Längs- und Quertrajektorie sowie der geplante Beschleunigungsverlauf für ein Beispielszenario

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

9. Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass sich das System auch gut für die reine Längsregelung im Rahmen eines ACCs (Abstandshaltetempomat) eignet. Somit ließe sich eine enge Integration von ACC und weiteren Assistenzfunktionen erreichen. Dies könnte noch weiter im Sinne einer energieoptimalen Fahrweise verbessert werden, wenn die Verlustenergie durch das Bremsen mit in das Gütemaß integriert wird. Zur Reduktion der Rechenzeit wäre es denkbar, für weiter in der Zukunft liegende Segmente eine größere Segmentlänge zu verwenden. Auf diese Weise findet erst eine Grobplanung des Fahrstreifenwechsels statt. Sobald der Fahrstreifenwechsel näher rückt, wird dann eine Detailplanung mit den kürzeren Segmenten realisiert.

Literatur:

[1] Dickmanns, E. D. URL: http://www.dyna-vision.de/main/M.2%20Action,%20behavioral%20components.html (abgerufen am 02.05.2017)

[2] Dickmanns, E. D. URL: http://www.dyna-vision.de/main/A.3.4%20Lane%20change.html (abgerufen am 02.05.2017).

[3] Nilsson, J., M. Brännström, E. Coelingh und J. Fredriksson: Longitudinal and lateral control for automated lane change maneuvers. In: 2015 American Control Conference (ACC), S. 1399–1404, Juli 2015. DOI: 10.1109/ACC.2015.7170929.

[4] Werling, M.: Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2011. DOI:10.5445/KSP/1000021738.

[5] Rathgeber, C., F. Winkler und S. Müller: Kollisionsfreie Längs- und Quertrajektorienplanung unter Berücksichtigung fahrzeugspezifischer Potenziale. In: at-Automatisierungstechnik, 64(1):S. 61–76, 2016. DOI: 10.1515/auto-2015-0052.

[6] Hansen, T., M. Schulz, M. Knoop und U. Konigorski: Trajektorienplanung für automatisierte Fahrstreifenwechsel. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 118(7):S. 66–71, 2016. DOI: 10.1007/s35148-016-0071-8.

[7] Schmidt, M.: minFunc: unconstrained differentiable multivariate optimization in Matlab. 2005. URL: https://www.cs.ubc.ca/~schmidtm/Software/minFunc.html (abgerufen am 27.04.2017).

[8] URL: http://www.timhansen.de/publications/autoreg/2017/video.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Simulationsbasierte Entwicklung eines Trajektorienplanungsverfahrens für automatisiertes Fahren

Simulation based Development of a Trajectory Planning Approach for Automated Driving

Christian Götte M.Sc., **Christian Wissing** M.Sc.,
Dipl.-Ing. **Martin Keller**, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. **Torsten Bertram**, TU Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, Dortmund;
Dr. rer. nat. **Till Nattermann**, Dr.-Ing. **Carsten Haß**,
Dr. rer. nat. **Karl-Heinz Glander**,
ZF TRW, Active & Passive Safety Technology, Düsseldorf

Kurzfassung

Ein Kernaspekt für die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen ist die vorausschauende Planung einer kollisionsfreien Trajektorie in Abhängigkeit der momentanen Verkehrssituation. Eine Begrenzung der Komplexität des Trajektorienplanungsverfahrens liegt in der benötigten Rechenzeit, welche an die Dynamik der Verkehrssituation angepasst sein muss. Der Beitrag stellt ein Verfahren zur Trajektorienplanung für die Anwendung in Normalsituationen vor und basiert dabei auf der Interpolation der Trajektorienpunkte zwischen optimierten Zuständen. Dies hat zum Ziel die Leistungsfähigkeit des Algorithmus vor allem in Bezug auf die Rechenzeit zu verbessern. Mit Hilfe einer Simulationsumgebung werden unterschiedliche Interpolationsstrategien untersucht und ein manöverbasierter Vergleich in Bezug auf die benötigte Rechenzeit sowie die Optimalität der Lösung im Sinne einer Kostenfunktion durchgeführt.

Abstract

A key aspect for the development of automated driving functions is the planning of a predictive trajectory in dependence of the current traffic situation. The complexity of the utilized trajectory planning approach is bounded by the available computation time that has to be in accordance with the dynamics of the surrounding environment. This work is concerned with an approach to trajectory planning for normal driving situations, which is based on interpolation of trajectory points between optimized states. This measure has the objective to improve the performance particularly with respect to the computational burden. By means of a simulation environment, different interpolation strategies are investigated and a maneuver-based

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

comparison with respect to computation time and optimality in terms of a defined cost function is performed.

1. Einleitung

Die Anzahl der Fahrerassistenzsysteme und automatisierten Fahrfunktionen in modernen Fahrzeugen nimmt stetig zu, wobei davon auszugehen ist, dass auch in Zukunft vermehrt Funktionen zur Bewältigung komplexer Situationen Einzug erhalten. Der Trend richtet sich dabei auf teil- und hochautomatisierte Systeme, welche den Fahrer entlasten, beziehungsweise zukünftig die Aufgabe des Fahrers vollständig übernehmen sollen. Der Einsatz automatisierter Fahrfunktionen motiviert sich zum größten Teil aus der Verbesserung der Verkehrssicherheit sowie des Komforts. Für eine vorrausschauende Fahrweise muss die nächste Generation aktiver Fahrfunktionen die Entwicklung der dynamischen Umgebung mit einbeziehen und somit neben der Prädiktion der Bewegung der anderen Verkehrsteilnehmer auch die eigene Bewegung des Fahrzeugs planen. Damit kommt dem Bereich der Trajektorienplanung eine besondere Rolle innerhalb der Architektur automatisierter Fahrzeuge zu. Die Herausforderung hierbei ist es für verschiedene komplexe Situationen jeweils eine fahrdynamisch realisierbare Trajektorie zu finden, welche sowohl kollisionsfrei ist, als auch die geltenden Verkehrsregeln einhält.

2. Verfahren zur Trajektorienplanung

In der Literatur findet sich eine Vielzahl verschiedener Ansätze zur Lösung des Trajektorienplanungsproblems. Die Verfahren zur Trajektorienplanung können hierbei in die vier folgenden Kategorien eingeteilt werden:

- Inkrementelle Suche,
- Graphen-Suche,
- Kurveninterpolation und
- Optimierung.

Die inkrementelle Suche umfasst Methoden wie das Rapidly-Exploring Random Tree (RRT) Verfahren [1], welches zufällig Zustände aus dem Konfigurationsraum entnimmt und den aktuellen Baum in Richtung dieser Stichprobe erweitert. Damit geht der Nachteil einher, dass bei steigender Dimension des Zustandsraumes auch die Anzahl notwendiger Stichproben für eine ausreichende Abdeckung des Zustandsraumes erhöht werden muss. Dies beeinflusst direkt die notwendige Rechenzeit zur Generierung der optimalen Lösung. Graphenbasierte Verfahren erzeugen in einem ersten Schritt einen Graphen, welcher die Kosten für das jeweilige Manöver beinhaltet. In einem zweiten Schritt wird die Trajektorie über ein Graphensuch-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

verfahren als der Zweig mit den geringsten Kosten bestimmt. Die Herausforderung bei diesem Vorgehen liegt in der Erzeugung eines Graphen, welcher für die vorliegende Situation eine geeignete Trajektorie enthalten muss. In Bezug auf die Optimalität der Trajektorie ist ersichtlich, dass die Lösung dieses Verfahrens lediglich auflösungvollständig ist, da eine Diskretisierung des Zustandsraumes vorgenommen werden muss. Eine feinere Diskretisierung steht dabei einer längeren Rechenzeit gegenüber. Ein Beispiel für ein graphenbasiertes Verfahren im Kontext des automatisierten Fahrens liefert [2]. Die dritte Kategorie, die Kurveninterpolationsverfahren, verwenden unter anderem Klothoiden, Polynome oder Splines zur Interpolation zwischen a priori bekannten Referenzpunkten. Für diesen Ansatz stellt die Generierung adäquater Referenzpunkte innerhalb der dynamischen Umgebung des Fahrzeugs die Herausforderung dar. Verfahren der Kurveninterpolation sind für die Planung einer Trajektorie im Hinblick auf Komfort und Sicherheit in strukturierter Umgebung geeignet und benötigen zudem eine geringe Rechenzeit. Die Stärke der Optimierungsverfahren liegt in der Berücksichtigung der dynamischen Umgebung und den physikalischen Limitierungen des Systems. Des Weiteren kann eine optimale Lösung für verschiedene komplexe Verkehrssituationen generiert werden. Zu den numerischen Optimierungsverfahren, welche die Systemdynamik des Fahrzeugs über ein Ein- bzw. Zweispurmodell abbilden, gehören die in [3] und [4] vorgestellten modellprädiktiven Planungs- und Regelungsverfahren. Verfahren der Online-Trajektorienoptimierung vereinfachen das Fahrdynamikmodell und approximieren das Verhalten des Fahrzeugs über ein Massenpunktmodell. Das so genannte Elastic Band [5] aus dem Bereich der mobilen Robotik wurde für die Trajektorienplanung zum Timed Elastic Band (TEB) Verfahren [6] erweitert. [7] und [8] übertragen dieses Vorgehen auf automotive Anwendungen. Zur Steigerung der Effizienz können die Verfahren der Online-Trajektorienoptimierung und der Kurveninterpolation miteinander verknüpft werden. Dies führt zu einer splinebasierten Trajektorienoptimierung. Ein Ansatz für die Anwendung in der mobilen Robotik verwendet einen b-Spline und optimiert das Kontrollpolygon zur Generierung einer zeitoptimalen Trajektorie [9]. Das in diesem Beitrag vorgestellte Verfahren verwendet Splines und optimiert direkt die Stützstellen anhand einer definierten Kostenfunktion, welche die Aspekte des automatisierten Fahrens berücksichtigt. Unter der Annahme, dass das Modell zur Interpolation die Bewegung des Fahrzeugs in diesem Abschnitt hinreichend genau approximiert, ist die suboptimale Lösung des Optimierungsproblems nicht nachteilig. Im Gegenteil, durch dieses Vorgehen lässt sich die Effizienz im Vergleich zu bisherigen Verfahren der Online-Trajektorienoptimierung erheblich steigern. Durch die Minimierung einer definierten Kostenfunktion wird die für die aktuelle Situation optimale Lösung gefunden. Dabei wird die Trajektorie ähnlich dem Konzept der modellprädiktiven Regelung fortlaufend neu

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

geplant. Im Hinblick auf die beschriebenen Eigenschaften wird der entwickelte Ansatz in Anlehnung an das TEB Verfahren als Timed Elastic Spline (TES) bezeichnet.

3. Online-Trajektorienoptimierung mit Spline-Interpolation

Die Online-Trajektorienoptimierung verwendet ein kinematisches Massenpunktmodell zur Approximation der Fahrdynamik. Die Trajektorie wird in den Fahrzeugkoordinaten F berechnet, welches seinen Ursprung in der Mitte der vorderen Stoßstange des Fahrzeugs hat. Unter Verwendung eines rechtshändigen Koordinatensystems entspricht die laterale Fahrzeugrichtung der y-Koordinate, während die x-Koordinate die longitudinale Richtung beschreibt. Das erdfeste Koordinatensystem wird im Folgenden über die vorangehende Hochstellung E gekennzeichnet. Das Problem der Trajektorienplanung für die Menge der Trajektorienpunkte B kann im Allgemeinen als nichtlineares Programm

$$\gamma^*(B, \mathbf{\Gamma}_i) = \min_B \sum_{i=1}^{z} \gamma_i(B, \mathbf{\Gamma}_i) \tag{1}$$

mit den Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}_1 &= \boldsymbol{x}_s, \\ \boldsymbol{f}_k(x) &= \mathbf{0}, \\ \boldsymbol{h}_{k(x)} &\leq \mathbf{0}, \end{aligned}$$

formuliert werden, wobei $\boldsymbol{x}_s$ den Startzustand, $\boldsymbol{f}_k(x)$ die Gleichheitsnebenbedingungen und $\boldsymbol{h}_k(x)$ die Ungleichheitsnebenbedingungen bezeichnet. Die z quadratischen Funktionen γ_i beinhalten die Ziele $\boldsymbol{o}_i$ der Trajektorienoptimierung, gewichtet mit der Diagonalmatrix $\mathbf{\Gamma}_i$

$$\gamma_i(B, \mathbf{\Gamma}_i) = \boldsymbol{o}_i^T(B)\mathbf{\Gamma}_i\boldsymbol{o}_i(B). \tag{2}$$

Für ein effizientes Lösen des Trajektorienplanungsproblems wird das Problem in ein nichtrestringiertes Optimierungsproblem überführt. Dazu werden die Nebenbedingungen durch weiche Nebenbedingungen approximiert und in die Kostenfunktion integriert. Aufgrund der vereinfachenden Annahme eines Massenpunktmodells werden Gleichheitsnebenbedingungen zur Einhaltung einer Systemdynamik nicht benötigt. Alle Ungleichheitsnebenbedingungen werden elementweise über die Funktion

$$\boldsymbol{\chi}(\mathbf{h}_\mathrm{k}) = \max\{[\mathbf{0}, \boldsymbol{h}_k]\} \tag{3}$$

angenähert und der Fehlervektor der Dimension d_{err} wird somit zu

$$\boldsymbol{e}(\boldsymbol{b}) = [\boldsymbol{o}_1, \boldsymbol{o}_2, \dots, \boldsymbol{o}_z, \boldsymbol{\chi}(\boldsymbol{h}_1), \boldsymbol{\chi}(\boldsymbol{h}_2), \dots, \boldsymbol{\chi}(\boldsymbol{h}_n)\ ]^T. \tag{4}$$

Die Optimierungsvariablen werden in dem Vektor $\boldsymbol{b}$ der Dimension d_{opt} zusammengefasst und die Kostenfunktion wird definiert als

$$\Phi = \boldsymbol{e}(\boldsymbol{b})^T\mathbf{\Omega}\mathbf{e}(\mathbf{b}) \tag{5}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

mit der Gewichtungsmatrix $\boldsymbol{\Omega}$, welche die entsprechenden Gewichte für die Optimierungsziele und Nebenbedingungen enthält. Die optimale Lösung ist dann gegeben durch

$$\boldsymbol{b}^* = \arg\min_{\boldsymbol{b}} \Phi(\boldsymbol{b}, \boldsymbol{\Omega}) = \boldsymbol{e}(\boldsymbol{b})^T \boldsymbol{\Omega} \mathbf{e}(\mathbf{b}) \,. \tag{6}$$

Das TEB Verfahren besteht aus den Zuständen $\boldsymbol{x}_k = \left[{}^F x_k,\ {}^F y_k \right]^T$ und konstanten Zeitintervallen $\Delta T_k = \Delta T$, sodass sich für $k = 1 \dots n$

$$B_{TEB} = \{\boldsymbol{x}_1, \Delta T_1, \boldsymbol{x}_2, \Delta T_2, \dots, \boldsymbol{x}_k, \Delta T_k, \dots, \boldsymbol{x}_n, T_p\} \tag{7}$$

ergibt und die Trajektorie des Ego-Fahrzeugs mit $t_k = t_{k-1} + \Delta T$ durch

$$\boldsymbol{x}_{ego} = \left[\boldsymbol{x}_1, t_1, \boldsymbol{x}_2, t_2, \dots, \boldsymbol{x}_k, t_k, \dots, \boldsymbol{x}_n, T_p\right]^T \tag{8}$$

gegeben ist. Da der Prädiktionshorizont T_p nicht als Teil der Optimierung aufgefasst wird sowie der Startzustand bereits gegeben ist, ist der Optimierungsvektor

$$\boldsymbol{b}_{TEB} = [\boldsymbol{x}_2, \boldsymbol{x}_3, \dots, \boldsymbol{x}_k, \dots, \boldsymbol{x}_n]^T. \tag{9}$$

Zwischen den Zuständen des TEB Verfahrens wird eine lineare Interpolation angenommen. Dies führt dazu, dass eine ausreichend große Anzahl an Bandpunkten gewählt werden muss, um eine entsprechend hohe Auflösung zu erhalten. Das TES Verfahren nutzt eine Interpolationsstrategie höherer Ordnung unter der Annahme, dass innerhalb jedes Splineintervals eine ausreichend genaue Approximation des automatisierten Manövers vorliegt. Somit kann eine geringere Anzahl zu optimierender Zustände gewählt werden, wobei die Auflösung der Trajektorie von der Interpolation unabhängig gewählt werden kann. Es wird ein Spline in ${}^F x(t)$ und ${}^F y(t)$ bestimmt. Für $\eta - 1$ Splinesegmente, $t \in [t_\iota\ t_{\iota+1}]$ mit $\iota = 1{,}2 \dots \eta$ und der Interpolationsordnung $\nu = 3, 5, 7, \dots$ ist der Spline $\boldsymbol{s}$ definiert als

$$\boldsymbol{s}_\iota(t) = \boldsymbol{c}_{\nu,\iota}(t - t_\iota)^\nu + \boldsymbol{c}_{\nu-1,\iota}(t - t_\iota)^{\nu-1} + \cdots + \boldsymbol{c}_{1,\iota}(t - t_\iota) + \boldsymbol{c}_{0,\iota} \,. \tag{10}$$

In Abhängigkeit der Interpolationsordnung ν werden über die Anfangs- und Endbedingungen für $\boldsymbol{x}_\iota = \left[{}^F x_\iota,\ {}^F y_\iota \right]^T$, respektive den dafür notwendigen Ableitungen $\dot{\boldsymbol{x}}_\iota$ bis $\boldsymbol{x}_\iota^{(\nu-2)}$ sowie den Kontinuitätsbedingungen $s_\iota(t_{\iota+1}) = s_{\iota+1}(t_{\iota+1})$ zwischen zwei Zeitintervallen die Splinekoeffizienten $\boldsymbol{c}_{0\dots\nu,\iota}$ bestimmt. Das TES ist dann gegeben durch

$$B_{TES} = \left\{\underline{\boldsymbol{x}}_1, \underline{\dot{\boldsymbol{x}}}_1, \dots, \underline{\boldsymbol{x}}_1^{(\nu-2)}, \underline{t}_1, \dots, \underline{\boldsymbol{x}}_\iota, \underline{\dot{\boldsymbol{x}}}_\iota, \dots, \underline{\boldsymbol{x}}_\iota^{(\nu-2)}, \underline{t}_\iota, \dots, \underline{\boldsymbol{x}}_\eta, \underline{\dot{\boldsymbol{x}}}_\eta, \dots, \underline{\boldsymbol{x}}_\eta^{(\nu-2)}, \underline{T}_p\right\}. \tag{11}$$

Der Unterstrich kennzeichnet hier die Zustände als Stützpunkte für die Interpolation. Zur Bestimmung des optimalen Übergangszeitpunktes von einem Interval zum nächsten, werden die Zeitpunkte $\underline{t}_\iota$ ebenfalls optimiert. Für das TES ergibt sich der Optimierungsvektor

$$\boldsymbol{b}_{TES} = \left[\underline{\boldsymbol{x}}_2, \underline{\dot{\boldsymbol{x}}}_2, \dots, \underline{\boldsymbol{x}}_2^{(\nu-2)}, \underline{t}_2, \dots, \underline{\boldsymbol{x}}_\iota, \underline{\dot{\boldsymbol{x}}}_\iota, \dots, \underline{\boldsymbol{x}}_\iota^{(\nu-2)}, \underline{t}_\iota, \dots, \underline{\boldsymbol{x}}_\eta, \underline{\dot{\boldsymbol{x}}}_\eta, \dots, \underline{\boldsymbol{x}}_\eta^{(\nu-2)}\right]^T. \tag{12}$$

Aufgrund der splinebasierten Formulierung kann das TES als zeitkontinuierlich betrachtet werden. Dies erlaubt die Wahl der zeitlichen Auflösung unabhängig von den Stützstellen ι

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

und dem Prädiktionshorizont T_p. Durch Interpolation werden $n = T_p/\Delta T + 1$ Trajektorienpunkte errechnet, woraus sich die Trajektorie des Ego-Fahrzeugs nach Gleichung *(8)* ergibt. Bild 1 zeigt exemplarisch eine Realisierung des TEB sowie Splinekonfigurationen mit einer unterschiedlichen Anzahl an Stützpunkten η.

Die

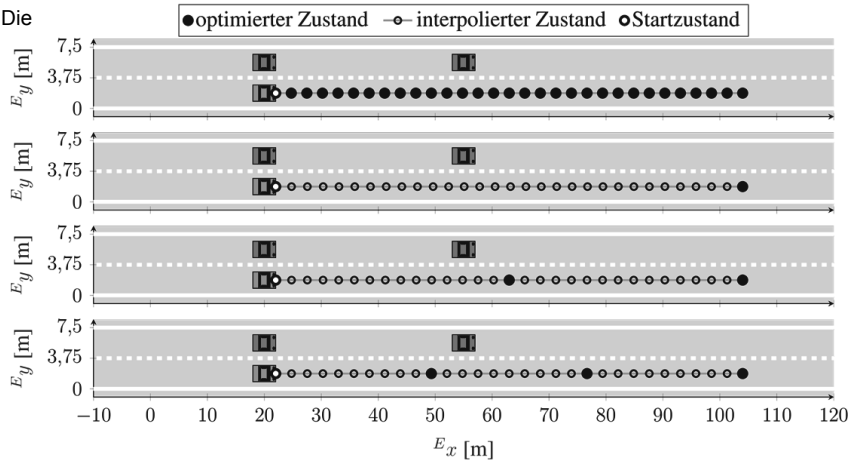


Bild 1: Darstellung des TEB (oben) und des TES für $\eta = 2{,}3{,}4$ Stützpunkte in einem Szenario mit zwei dynamischen Hindernissen auf der benachbarten Fahrspur.

Die optimale Trajektorie wird durch die Minimierung einer definierten Kostenfunktion bestimmt, welche die einzelnen Ziele des automatisierten Fahrens beinhaltet. Die Optimierungsziele umfassen neben der Minimierung der Beschleunigung in lateraler und longitudinaler Richtung

$$\boldsymbol{o}_1 = {}^{F}\boldsymbol{a}_x\,, \qquad \boldsymbol{o}_2 = {}^{F}\boldsymbol{a}_y\,, \tag{13}$$

der Optimierung des Rucks

$$\boldsymbol{o}_3 = {}^{F}\boldsymbol{j}_x\,, \qquad \boldsymbol{o}_4 = {}^{F}\boldsymbol{j}_y\,, \tag{14}$$

und durch die Optimierung des Zielzustandes auch die Bestrafung der Abweichung von der gewünschten Zielposition, dem gewünschten Kurswinkel λ und der Sollgeschwindigkeit v

$$o_5 = \left|{}^{F}x_n - {}^{F}x_g\right|, \quad o_6 = \left|{}^{F}y_n - {}^{F}y_g\right|, \quad o_7 = \left|{}^{F}\lambda_n - {}^{F}\lambda_g\right|, \quad o_8 = \left|{}^{F}v_n - {}^{F}v_g\right|. \tag{15}$$

Die Ungleichheitsnebenbedingungen ergeben sich aufgrund der Restriktionen, welche aus der fahrdynamischen Realisierbarkeit und dem Umfeld resultieren. Zur Berücksichtigung der

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

dynamischen Hindernisse werden diese als Massenpunkte mit geometrischen Abmessungen modelliert und unter Annahme einer konstanten Geschwindigkeit prädiziert. Für jedes Hindernisfahrzeug ergibt sich mit dem Sicherheitsabstand Λ_{obs}

$$h_{obs,k} = \left\| \begin{bmatrix} {}^{F}x_k - {}^{F}x_{obs,k} \\ {}^{F}y_k - {}^{F}y_{obs,k} \end{bmatrix} \right\|_2 - \Lambda_{obs} \,. \tag{16}$$

Die Begrenzung des befahrbaren Bereichs wird über die Approximation der Fahrbahnmarkierungen als Polynome dritten Grades vorgenommen und anhand der Differenz zwischen den ${}^{F}y$-Koordinaten ausgewertet. Mit dem Mindestabstand Λ_{str} ergibt sich

$$h_{left,k} = \left| {}^{F}y_k - {}^{F}y_{left,k} \right| - \Lambda_{str} \,, \qquad h_{right,k} = \left| {}^{F}y_k - {}^{F}y_{right,k} \right| - \Lambda_{str} \,. \tag{17}$$

Für die Einhaltung der Fahrdynamik wird der Kamm'sche Kreis herangezogen, welcher die maximale Beschleunigung der geplanten Trajektorie des Ego-Fahrzeugs auf Λ_{amax} begrenzt

$$h_{amax,k} = {}^{F}a_{tot.k} - \Lambda_{amax} \,. \tag{18}$$

Des Weiteren wird die nichtholonome Kinematik des Fahrzeugs über geschwindigkeitsabhängige Beschleunigungsgrenzen Λ_{alat} in lateraler Richtung abgebildet

$$h_{alat,k} = \left| {}^{F}a_{y,k} \right| - \Lambda_{alat}\left({}^{F}v_k \right) . \tag{19}$$

Die fahrzeugspezifischen Beschränkungen der Beschleunigung in longitudinaler Richtung Λ_{alon} werden ebenfalls geschwindigkeitsabhängig modelliert

$$h_{alon,k} = \left| {}^{F}a_{x.k} \right| - \Lambda_{alon}\left({}^{F}v_k \right) . \tag{20}$$

Alle Ungleichheitsnebenbedingungen werden in dem Vektor $\boldsymbol{h}_k$ zusammengefasst und über Gleichung *(4)* in das Optimierungsproblem integriert.

4. Analyse und Ergebnisse der splinebasierten Trajektorienplanung

Im Folgenden wird eine manöverbasierte Auswertung des TES Verfahrens durchgeführt und mit den Ergebnissen des TEB Verfahrens verglichen. Dazu wird das TES für verschiedene Interpolationsordnungen und einer verschiedenen Anzahl an Stützpunkten generiert. Tabelle 1 zeigt die gewählten Konfigurationen. Für die Auswertung liegt allen Ausführungen die gleiche Kostenfunktion zugrunde. Zudem ist die Trajektorie des Ego-Fahrzeugs für jede Konfiguration mit $n = 31$ Trajektorienpunkten, einer zeitlichen Auflösung von $\Delta T = 0{,}1\,\mathrm{s}$ und einem Planungshorizont von $T_p = 3\,\mathrm{s}$ identisch, sodass ein Vergleich in Bezug auf die Optimalität anhand der Kosten durchgeführt werden kann. Der Unterschied zwischen dem TEB und den gewählten Ausführungen des TES liegt somit vor allem in der Dimension d_{opt} des Optimierungsvektors $\boldsymbol{b}$.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 1: Auflistung der untersuchten Konfigurationen.

	ν [ ]	η [ ]	d_{opt} [ ]	n [ ]	ΔT [s]	T_p [s]
TEB	-	-	30	31	0,1	3
TES	3	2	4	31	0,1	3
	3	3	9	31	0,1	3
	3	4	14	31	0,1	3
	5	2	6	31	0,1	3
	5	3	13	31	0,1	3
	5	4	20	31	0,1	3

Für die Entwicklung bzw. Evaluation des TES wird auf eine Simulationsumgebung zurückgegriffen. Die verwendete Verkehrssimulation modelliert unter anderem die Sensordatenverarbeitungskette und bestimmt das Fahrverhalten der Hindernisfahrzeuge anhand etablierter Fahrermodelle [10]. Für die Analyse wird ein Szenario mit einer zweispurigen Fahrbahn mit drei Hindernisfahrzeugen erstellt. Tabelle 2 zeigt die Anfangsbedingungen für das simulierte Szenario. Dieses lässt sich in drei zeitliche Abschnitte einteilen. In einem ersten Abschnitt ist ein Einfädelmanöver notwendig, da der eigene Fahrstreifen durch ein stehendes Hindernisfahrzeug blockiert ist. In dem zweiten Abschnitt soll das vorausfahrende Fahrzeug überholt werden, bevor im letzten Abschnitt ein Spurwechsel durchgeführt wird, um auf den rechten Fahrstreifen zurückzukehren.

Tabelle 2: Anfangsbedingungen für das Ego-Fahrzeug sowie der Hindernisfahrzeuge.

	${}^{E}x$ [m]	${}^{E}y$ [m]	${}^{F}v$ [km/h]	${}^{F}\lambda$ [°]
Ego-Fahrzeug	20	1,875	100	0
Hindernisfahrzeug 1	20	5,625	100	0
Hindernisfahrzeug 2	55	5,625	90	0
Hindernisfahrzeug 3	145	1,875	0	0

Alle untersuchten Ausführungen werden im geschlossenen Regelkreis simuliert und lösen das Szenario kollisionsfrei. Die Verfahren zur Trajektorienplanung sind dabei auf die zur Verfügung stehende Rechenzeit für eine echtzeitfähige Anwendung begrenzt. Aus diesem Grund wird die Anzahl der durchgeführten Optimierungsiterationen auf $k_{opt} = 15$ festgelegt. In Bild 2 sind die Mittelwerte der optimalen Kosten sowie der Optimierungsdauer über das gesamte Szenario dargestellt. Die Rechenzeit wird dabei auf die Rechenzeit des TEB Ver-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

fahrens bezogen. Es zeigt sich, dass die Ausführungen des TES Verfahrens mit der Interpolationsordnung $\nu = 5$ sowie die Ausführungen mit $\eta = 4$ Stützpunkten durch die begrenzte Anzahl an Optimierungsiterationen nicht vollständig konvergiert sind. Im Vergleich mit dem TEB kann jedoch herausgestellt werden, dass das TES Verfahren weniger Rechenzeit benötigt und die optimale Trajektorie eine ähnliche Güte aufweist. Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass sich die approximierte Darstellung durch die splinebasierte Interpolation nicht nachteilig in Bezug auf die Minimierung der Kostenfunktion auswirkt. Es kann im Gegenteil eine signifikante Leistungssteigerung durch die Reduktion der Rechenzeit erzielt werden.

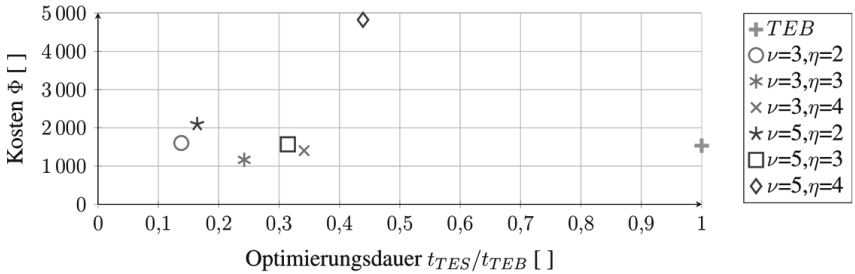


Bild 2: Mittelwerte der resultierenden Kosten und der Optimierungsdauer für das betrachtete Szenario für die gewählten Ausführungen von TEB und TES.

Anhand der Ergebnisse lässt sich zudem erkennen, dass bei steigender Dimension des Optimierungsvektors d_{opt} auch die benötigte Rechenzeit zunimmt. Dieser Zusammenhang lässt sich anhand der Eigenschaften des verwendeten Levenberg-Marquardt Optimierungsalgorithmus erklären. So haben zum einen die numerische Berechnung der Jacobimatrix und zum anderen die Berechnung der inversen Hessematrix für die iterative Aktualisierung des Optimierungsvektors einen Einfluss auf die Rechenzeit.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse für das TES Verfahren mit der kleinsten ($\nu = 3, \eta = 2$) und größten ($\nu = 5, \eta = 4$) Optimierungsdimension d_{opt} näher betrachtet werden. Dazu werden die Manöver der beiden Verfahren miteinander verglichen. Bild 3 zeigt die gefahrenen Manöver aus der Vogelperspektive.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

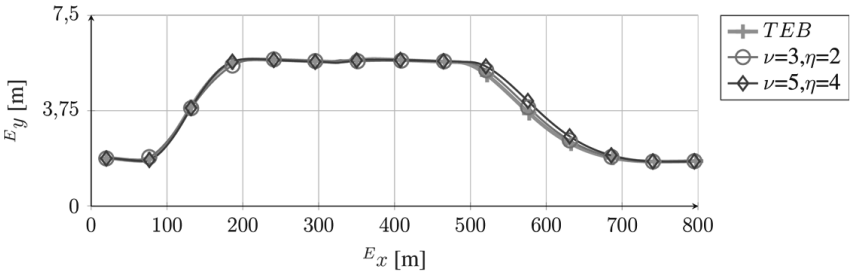


Bild 3: Darstellung der gefahrenen Manöver in Erdkoordinaten E für das TEB Verfahren und zwei Ausführungen des TES Verfahrens.

Durch die Beschränkungen aufgrund der dynamischen Umgebung während des Einfädelmanövers sind die Abweichungen zwischen den drei Realisierungen auf den ersten $200\ \mathrm{m}$ sehr gering. Auch während des Überholvorgangs des langsameren Fahrzeugs zwischen $200\ \mathrm{m}$ und $500\ \mathrm{m}$ sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Verfahren erkennbar. Erst im letzten Abschnitt ($500\ \mathrm{m}$ bis $800\ \mathrm{m}$) ergeben sich bei der Durchführung des Spurwechsels leichte Unterschiede. Der Vergleich zeigt insgesamt nur geringfügige Abweichungen in den Realisierungen. Dies bestätigt die Annahme, dass das Modell zur Interpolation die Bewegung des Fahrzeugs hinreichend genau approximiert und motiviert damit gleichzeitig das Vorgehen der splinebasierten Trajektorienplanung. Diese Beobachtung lässt sich weiterführend für die untersuchten Ausführungen exemplarisch anhand der geplanten Manöver zum Zeitpunkt $t = 2\ \mathrm{s}$ belegen (siehe Bild 4).

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

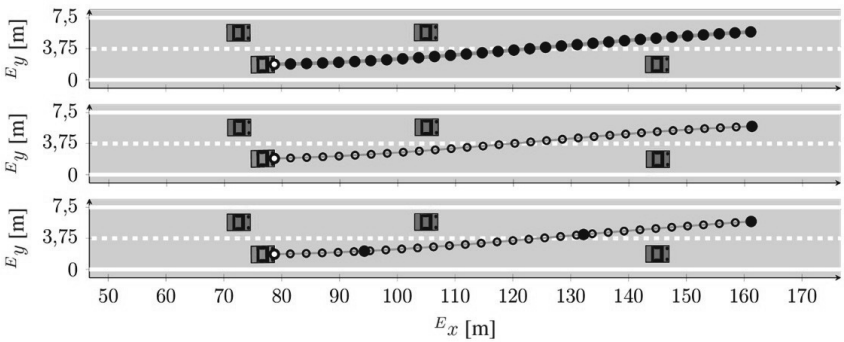


Bild 4: Darstellung der geplanten Trajektorie für TEB (oben), TES mit Interpolationsordnung $\nu = 3$ und $\eta = 2$ Stützpunkten (mittig) und TES mit Interpolationsordnung $\nu = 5$ und $\eta = 4$ Stützpunkten (unten) zum Zeitpunkt $t = 2\,\mathrm{s}$.

Die geringsten mittleren Kosten erzielt das TES Verfahren mit der Interpolationsordnung $\nu = 3$ und $\eta = 3$ Stützpunkten. Das Ergebnis für den ersten Abschnitt des durchgeführten Manövers ist in Bild 5 gezeigt. Das Ego-Fahrzeug beschleunigt, um in die freie Lücke zwischen den beiden Hindernisfahrzeugen auf der linken Fahrbahn einfädeln zu können. Die geplante Trajektorie berücksichtigt dabei über eine Prädiktion die Bewegung der dynamischen Hindernisse.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

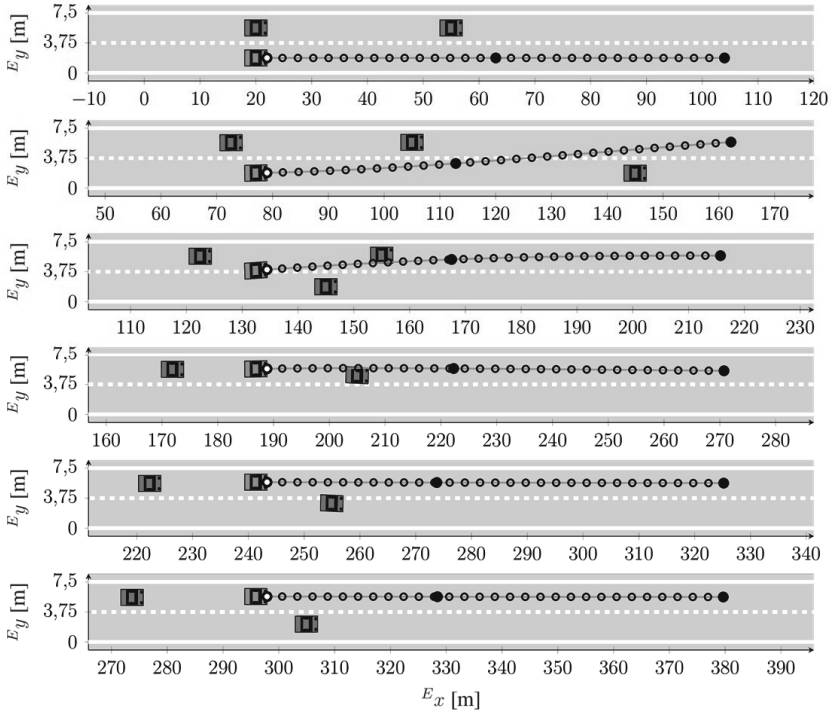


Bild 5: Darstellung des gefahrenen Manövers und der geplanten Trajektorie für das TES mit Interpolationsordnung $\nu = 3$ und $\eta = 3$ Stützpunkten für den ersten Abschnitt des untersuchten Szenarios zu den Zeitpunkten $t = 0, 2, 4, \ldots, 10$ s (von oben nach unten).

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag untersucht ein Verfahren der Online-Trajektorienoptimierung, welches durch eine Interpolationsstrategie die Anzahl an benötigten Optimierungsvariablen verringern und damit die Effizienz zur Lösung des Trajektorienplanungsproblems steigern kann. Die Suboptimalität aufgrund der approximierten Darstellung von Trajektorienabschnitten über einen Spline wirkt sich nicht nachteilig aus. Die Analyse belegt die Gültigkeit dieser Annahme, da die Ergebnisse sowohl in den durchgeführten Manövern, als auch in den geplanten Trajektorien keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Das vorgestellte Timed Elastic Spline Verfahren kombiniert somit erfolgreich die Stärken eines Optimierungsverfahrens mit

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

denen der Kurveninterpolation. Der nächste Schritt wird sich mit der Untersuchung bezüglich der Anwendung des Verfahrens für weitere Manöverklassen befassen.

Literatur:

[1] S. LaValle, „Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning“, in *Iowa State University – Technical Report 98-11*, 1998.

[2] C. Rathgeber, F. Winkler und S. Müller, „Kollisionsfreie Längs- und Quertrajektorienplanung unter Berücksichtigung fahrzeugspezifischer Potenziale“, *at – Automatisierungstechnik,* S. 61-76, 2016.

[3] C. Götte, M. Keller, C. Rösmann, T. Nattermann, C. Haß, K. Glander, A. Seewald und T. Bertram, „A real-time capable model predictive approach to lateral vehicle guidance“, in *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, S. 1908-1913, 2016.

[4] C. Götte, M. Keller, C. Haß, K. Glander, A. Seewald und T. Bertram, „A model predictive combined planning and control approach for guidance of automated vehicles“, in *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, S. 69-74, 2015.

[5] S. Quinlan und O. Khatib, „Elastic Bands: connecting path planning and control“, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, S. 802-807, 1993.

[6] C. Rösmann, W. Feiten, T. Woesch, F. Hoffmann und T. Bertram, „Trajectory modification considering dynamic constraints of autonomous robots“, in *Proceedings of ROBOTIK 2012 - 7th German Conference on Robotics*, S. 74-79, 2012.

[7] J. Ziegler, P. Bender, T. Dang und C. Stiller, „Trajectory planning for bertha – a local, continuous method“, in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 450-457, 2014.

[8] M. Keller, F. Hoffmann, T. Bertram, C. Haß und A. Seewald, „Planning of optimal collision avoidance trajectories with timed elastic bands“, in *Proceedings of the 19th IFAC World Congress*, S. 9822-9827, 2014.

[9] T. Mercy, W. van Look und G. Pipeleers, „Real-time motion planning in the presence of moving obstacles“, in *European Control Conference (ECC)*, S. 1586-1591, 2016.

[10] C. Wissing, T. Nattermann, K. Glander, A. Seewald und T. Betram, „Umgebungssimulation zur Entwicklung, Evaluierung und Verifikation von unterlagerten Algorithmen für das automatisierte Fahren“, in *Automotive meets Electronics (AmE) – 7th GMM Symposium*, S. 9-14, 2016.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Modellbasierte Regelung des Anfahrvorgangs mit einem hybriden Antriebsstrang für Kraftfahrzeuge

Dipl.-Ing. **Lothar Kiltz**, ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen;
Tobias Mindel B. Eng.; Dipl.-Ing. (FH) **Alexander Jungaberle**

Kurzfassung

Es werden zwei modellbasierte Regler für den Anfahrvorgang eines PKWs mit einem hybriden Antriebsstrang vorgestellt, wobei die Drehmomente der Motoren über ein Planetengetriebe summiert werden. Modellunbestimmtheiten werden mittels eines Beobachters mit Lastmomentschätzer kompensiert. Das Verhalten des geregelten Antriebsstrangs wird anhand von Simulationsstudien des Gesamtfahrzeugs diskutiert.

1. Einleitung

Mit zunehmenden Anforderungen an die Energieeffizienz von Kraftfahrzeugen und die Reduktion lokaler Schadstoffemissionen in Ballungsräumen nimmt die Bedeutung hybrider Antriebskonzepte zu. Über die Verbesserung der Ökobilanz hinaus kann mit hybridisierten Antrieben auch ein verbesserter Fahrkomfort kombiniert mit einer erhöhten Fahrdynamik erreicht werden.

Ein Beispiel hierfür ist die in Bild 1 skizzierte Antriebsstrangtopologie mit einem Verbrennungsmotor und einem Elektromotor, die mechanisch mit dem Hohlrad (Ho) bzw. Sonnenrad (So) eines einstufigen Planetengetriebes verbunden sind. Der Planetenträger (Tr) dieses Planetengetriebes ist mit dem Eingang eines konventionellen Stufenautomatgetriebes verbunden. Eine Besonderheit des Antriebsstrangkonzepts besteht darin, dass mit der Kupplung K1 zwischen einem leistungsverzweigten Hybridbetrieb (K1 geöffnet) und einem parallelen Hybridbetrieb (K1 geschlossen) gewechselt werden kann. Im ersten Fall summiert das Planetengetriebe die Drehmomente der beiden Motoren und Hohlrad, Sonnenrad und Planetenträger drehen sich im Allgemeinen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, wohingegen sich im zweiten Fall das Planetengetriebe im Blockumlauf befindet, sich also das Hohlrad, das Sonnenrad und der Planetenträger und somit auch der Eingang des Stufenautomatgetriebes mit derselben Geschwindigkeit drehen. In letzterem Betriebsfall kann der Verbrennungsmotor mit der Kupplung K0 vom Antriebsstrang abgekoppelt werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

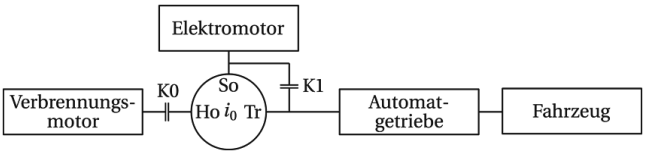


Bild 1: Betrachtete Antriebsstrangtopologie.

Im Vergleich zu rein parallel-hybriden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge kann durch den optionalen leistungsverzweigten Betrieb ein mechanisches Anfahrelement, bspw. eine Reibkupplung oder ein hydrodynamischer Drehmomentwandler, entfallen. Stattdessen können bei geöffneter Kupplung K1 und geschlossener Kupplung K0 durch geeignete Ansteuerung des Verbrennungsmotors und des Elektromotors prinzipiell beliebige, im Rahmen der physikalischen Stellgrößenbegrenzungen mögliche Trajektorien entweder des Drehmoments oder der Drehgeschwindigkeit am Eingang des Stufenautomatgetriebes und gleichzeitig der Drehgeschwindigkeit des Verbrennungsmotors realisiert werden. So wird bspw. ein Dauerkriechen des Fahrzeugs möglich, ohne ein Anfahrelement zu überhitzen; gleichzeitig kann die Fahrzeugbatterie aufgeladen werden.

Dieser Beitrag behandelt den Anfahrvorgang im leistungsverzweigten Betrieb, also bei geöffneter Kupplung K1, geschlossener Kupplung K0 und konstanter Übersetzung des Stufenautomatgetriebes. Für diesen Betriebsfall werden zwei verschiedene modellbasierte Reglerstrategien vorgeschlagen. Der erste der beiden Regler stellt einen Drehmomentverlauf am Eingang des Stufenautomatgetriebes ein, gestattet also die Realisierung eines gewünschten Beschleunigungsverlaufs des Fahrzeugs. Der zweite Regler regelt direkt die Geschwindigkeit am Eingang des Stufenautomatgetriebes und somit des Fahrzeugs. Beide Regler regeln überdies die Drehgeschwindigkeit des Verbrennungsmotors und erlauben so dessen Betrieb mit besonders geringem Kraftstoffverbrauch.

Der Rest dieser Arbeit ist wie folgt gegliedert. In Kapitel 2 wird das mathematische Modell der Regelstrecke für den betrachteten Betriebsfall beschrieben. Basierend auf dem Modell werden in Kapitel 3 ein Beobachter zur phasenverzugsarmen Glättung der Drehzahlsignale und Schätzung der Drehbeschleunigungen sowie die Regler erörtert. Kapitel 4 demonstriert die Eigenschaften der Regler anhand von Simulationsergebnissen. Die wichtigsten Resultate werden in Abschnitt 5 zusammengefasst.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Modell der Regelstrecke

Als Grundlage für den Beobachter- und Reglerentwurf in Kapitel 3 wird ein Modell der Dynamik des Planetengetriebes benötigt, welches die Drehmomente der beiden Motoren summiert. Außerdem wird ein einfaches Modell für das vom Fahrzeug auf das Planetengetriebe rückwirkende Lastmoment angegeben.

2.1 Planetengetriebe

Der Planetenradsatz besteht aus dem mit dem Elektromotor verbundenen Sonnenrad, welches über die Planetenräder auf dem mit dem Verbrennungsmotor verbundenen Hohlrad abrollt. Die Planetenräder sind auf dem Planetenträger drehbar gelagert; dieser ist mit dem Eingang des Stufenautomatgetriebes (im Folgenden als Getriebeeingang bezeichnet) verbunden und dreht sich seinerseits relativ zum Sonnen- und Hohlrad.

Vernachlässigt man die verhältnismäßig geringe Trägheit der Planetenräder und die Reibung des Planetengetriebes, so können dessen Bewegungsgleichungen in der Form

$$J\dot{\omega} = M \tag{1}$$

mit

$$J \coloneqq \begin{pmatrix} J_{GE} + i_{_}^2 J_{EM} & i_{_} i_0 J_{EM} \\ i_{_} i_0 J_{EM} & J_{VM} + i_0^2 J_{EM} \end{pmatrix},\ \omega \coloneqq \begin{pmatrix} \omega_{GE} \\ \omega_{VM} \end{pmatrix},\ M \coloneqq \begin{pmatrix} i_{_} M_{EM} - M_{FZG} \\ M_{VM} + i_0 M_{EM} \end{pmatrix} \tag{2}$$

angeschrieben werden, wobei $\dot{\omega}$ die zeitliche Ableitung von ω bezeichnet. Des Weiteren bezeichnen i_0 die Standübersetzung des Planetengetriebes, $i_{_} \coloneqq 1 - i_0$, J_{GE} das am Getriebeeingang wirksame Trägheitsmoment des Stufenautomatgetriebes und des Fahrzeugs, J_{VM} und J_{EM} die Trägheitsmomente des Verbrennungs- und Elektromotors, ω_{GE} und ω_{VM} die Winkelgeschwindigkeiten des Getriebeeingangs und des Verbrennungsmotors, M_{EM} und M_{VM} die Antriebsmomente des Elektro- und des Verbrennungsmotors und M_{FZG} das am Getriebeeingang wirksame Lastmoment.

2.2 Lastmoment

Das Lastmoment M_{FZG} in (2) resultiert unter anderem aus dem Rollwiderstand der Reifen, dem Schleppmoment des Stufenautomatgetriebes, der Hangabtriebskraft des Fahrzeugs in Fahrtrichtung und den von den Radbremsen generierten Bremsmomenten. Das Lastmoment variiert daher sehr stark in Abhängigkeit der Fahrsituation und der Umgebungsbedingungen und kann insbesondere nicht als a priori bekannt angenommen werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Zur Verbesserung der Regelgüte wird in den in Abschnitt 3 beschriebenen Algorithmen derjenige Anteil des Lastmoments explizit berücksichtigt, der einfach modelliert werden kann; der verbleibende Anteil des Lastmoments wird per Beobachter geschätzt. Das Lastmoment wird also in den bekannten Anteil M_{FZG}^{*} und den unbekannten Anteil ΔM aufgeteilt:

$$M_{FZG} = M_{FZG}^{*} + \Delta M. \tag{3}$$

Infolge der geringen Fahrzeuggeschwindigkeit beim Anfahrvorgang resultieren dominante Anteile des Lastmoments aus dem Rollwiderstand der Reifen und, je nach Hangneigung, der Hangabtriebskraft des Fahrzeugs. Gleichzeitig können Nominalwerte dieser Größen einfach aus den verfügbaren Messsignalen der Fahrzeuggeschwindigkeit und Hangneigung errechnet werden. Daher setzt sich der bekannte Anteil M_{FZG}^{*} des Lastmoments aus dem nominalen Rollwiderstand der Reifen und der nominalen Hangabtriebskraft zusammen.

3. Beobachter- und Reglerentwurf

Dieser Abschnitt adressiert die Bereitstellung eines gewünschten Drehmoments am Getriebeeingang sowie, alternativ, die Regelung einer Geschwindigkeit des Getriebeeingangs. Gleichzeitig soll in beiden Fällen der Verbrennungsmotor einem gewünschten Drehgeschwindigkeitsverlauf folgen. Dank unterlagerter Regler für die beiden Motoren können deren Drehmomente als Stellgrößen betrachtet werden. Die Drehgeschwindigkeiten des Getriebeeingangs und des Verbrennungsmotors sowie die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Fahrzeugneigung in Längsrichtung stehen als Messgrößen zur Verfügung.

3.1 Rekonstruktion der Drehgeschwindigkeiten und -beschleunigungen

Der Regler in Abschnitt 3.2 benötigt den Verlauf der Drehbeschleunigung des Getriebeeingangs. Für die phasenverzugsarme Schätzung dieser nicht gemessenen Größe wird in diesem Abschnitt ein Beobachter vorgeschlagen. Hierbei wird ein besonderes Augenmerk darauf gelegt, dass die Drehgeschwindigkeitssignale bei geringen Drehbeschleunigungen verhältnismäßig große Quantisierungssprünge zeigen, die Quantisierungsfehler also nicht in guter Näherung als Musterfunktionen breitbandiger schwach stationärer stochastischer Prozesse modelliert werden können [1].

Da die Trägheitsmatrix J in (2) positiv definit und somit regulär ist, ist die Rekonstruktion der Drehgeschwindigkeitssignale ω und der Drehbeschleunigungen $\dot{\omega}$ äquivalent zur Rekonstruktion der Drehimpulse $p \coloneqq J\omega$ und deren zeitlicher Ableitungen $\dot{p}$. Separiert man ferner

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

gemäß (3) die bekannten Anteile M^* der Drehmomente M in den Bewegungsgleichungen (1) vom unbekannten Anteil ΔM des Lastmoments, so können jene zu

$$\dot{p} = \underbrace{\begin{pmatrix} i_{-}M_{EM} - M^*_{FZG} \\ M_{VM} + i_0 M_{EM} \end{pmatrix}}_{=:M^*} - \begin{pmatrix} \Delta M \\ 0 \end{pmatrix} \tag{4}$$

umgeschrieben werden. Ferner wird angenommen, dass ΔM langsam veränderlich ist, also näherungsweise $\Delta \dot{M} \approx 0$ gilt. Die Auswirkung dieser Vereinfachung auf die Schätzergebnisse wird am Ende dieses Abschnitts analysiert.

Schätzwerte $\hat{p}$ und $\hat{M}_{FZG} \coloneqq M^*_{FZG} + \Delta\hat{M}$ von p und M_{FZG} können prinzipiell mit dem Zustandsbeobachter [2]

$$\begin{aligned} \dot{\hat{p}} &= M^* - \begin{pmatrix} \Delta\hat{M} \\ 0 \end{pmatrix} - \lambda_p \tilde{p}, \\ \Delta\dot{\hat{M}} &= \lambda_M \tilde{p} \end{aligned} \tag{5}$$

ermittelt werden, wobei $\tilde{p} \coloneqq \hat{p} - p$ den Beobachterfehler der Drehimpulse bezeichnet und über die Beobachterverstärkungen $\lambda_p \in \mathbb{R}^{2\times 2}$, $\lambda_M \in \mathbb{R}^{1\times 2}$ die Dynamik des Schätzfehlers eingestellt werden kann. Die erste Zeile von (5) liefert direkt Schätzwerte für die zeitlichen Ableitungen der Drehimpulse. Jedoch führen Quantisierungssprünge in den gemessenen Drehimpulsen p zu Sprüngen in $\dot{\hat{p}}$, die umso größer sind, je größer die Beobachterverstärkungen λ_p gewählt wurden.

Um Sprünge in den geschätzten Drehbeschleunigungen zu vermeiden, wird (5) zu

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{q}} &= \lambda_q^{-1}(\tilde{p} - \tilde{q}), \\ \dot{\hat{p}} &= M^* - \begin{pmatrix} \Delta\hat{M} \\ 0 \end{pmatrix} - \lambda_p \tilde{q}, \\ \Delta\dot{\hat{M}} &= \lambda_M \tilde{p} \end{aligned} \tag{6}$$

mit $\lambda_q \in \mathbb{R}^{2\times 2}$ erweitert. Die zusätzlichen Beobachterzustände $\tilde{q}$ sind also tiefpassgefilterte Linearkombinationen von $\tilde{p}$ und bleiben somit auch bei Sprüngen in p stetig. Anstelle von $\tilde{p}$ werden dann die stetigen Verläufe $\tilde{q}$ in der zweiten Gleichung in (6) verwendet. Wählt man die Beobachterverstärkungen zu

$$\lambda_{\mathrm{q}} = \begin{pmatrix} \lambda_{q,1} & 0 \\ 0 & \lambda_{q,2} \end{pmatrix}, \quad \lambda_p = \begin{pmatrix} \lambda_{p,1} & 0 \\ 0 & \lambda_{p,2} \end{pmatrix}, \quad \lambda_m = (\lambda_{m,1} \quad 0), \tag{7}$$

dann regt das unbekannte Lastmoment ΔM die erste Komponente $\tilde{p}_1$ des Drehimpulsschätzfehlers $\tilde{p}$ sowie das geschätzte Lastmoment $\Delta\hat{M}$ gemäß

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$\begin{aligned}\tilde{p}_1 &= \frac{s\left(\lambda_{q,1}s+1\right)}{\lambda_{q,1}s^3+s^2+\left(\lambda_{q,1}\lambda_{m,1}+\lambda_{p,1}\right)s+\lambda_{m,1}}\Delta M,\\ \Delta\widehat{M} &= \frac{\lambda_{m,1}\left(\lambda_{q,1}s+1\right)}{\lambda_{q,1}s^3+s^2+\left(\lambda_{q,1}\lambda_{m,1}+\lambda_{p,1}\right)s+\lambda_{m,1}}\Delta M\end{aligned} \tag{8}$$

an, wobei s den zeitlichen Ableitungsoperator bezeichnet [3]; die zweite Komponente von $\tilde{p}$ ist dann sogar von ΔM unabhängig. Im Grenzübergang $\lambda_{m,1} \to \infty$ liefert (8)

$$\tilde{p}_1 \to \frac{s}{\lambda_{m,1}}\Delta M,\ \ \Delta\widehat{M} \to \Delta M. \tag{9}$$

Die Schätzfehler, die aus der Modellannahme eines langsam veränderlichen unbekannten Lastmoments herrühren, können also prinzipiell beliebig klein gemacht werden.

3.2 Steuerung des getriebeeingangsseitigen Drehmoments und Regelung der Verbrennungsmotorgeschwindigkeit

Aus (1) und (2) folgt

$$\det J\,\dot{\omega}_{GE} = i_{_}(J_{VM}M_{EM} - i_0 J_{EM}M_{VM}) - (J_{VM} + i_0^2 J_{EM})M_{FZG}. \tag{10}$$

D. h.,

$$M_{GE} := \frac{J_{VM}M_{EM} - i_0 J_{EM}M_{VM}}{\kappa} \tag{11}$$

mit $\kappa := J_{VM} - i_0 J_{EM}$ kann als das am Getriebeeingang wirksame skalierte Antriebsmoment interpretiert werden. Gleichung (11) liefert im Umkehrschluss eine erste Bedingung für die Motormomente, sofern ein bestimmtes Antriebsmoment am Getriebeeingang bereitgestellt werden soll.

Der verbleibende Freiheitsgrad zur Bestimmung der Motormomente kann dazu genutzt werden, die Drehgeschwindigkeit des Verbrennungsmotors zu regeln. Zum Entwurf eines entsprechenden flachheitsbasierten Trajektorienfolgereglers [4] wird eine global asymptotisch stabile autonome Dynamik [5]

$$\dot{\tilde{\omega}}_{VM} + \phi_{VM}(\tilde{\omega}_{VM}) + k_{VM}\int \tilde{\omega}_{VM}dt = 0,\ \ k_{VM} \geq 0, x\phi_{VM}(x) > 0 \forall x \neq 0 \tag{12}$$

für die Regelabweichung $\tilde{\omega}_{VM} := \omega_{VM} - \omega_{VM,ref}$ vorgegeben, wobei $\omega_{VM,ref} \in \mathcal{C}^1$ der Sollverlauf von ω_{VM} ist. Durch die Wahl von ϕ_{VM} kann beispielsweise dafür gesorgt werden, dass geringe Regelfehler verhältnismäßig langsam kompensiert und hierdurch Antriebsstrangschwingungen infolge von bei der Modellbildung vernachlässigten Elastizitäten nur wenig angeregt werden, während große Regelfehler rasch abklingen. Löst man (12) nach $\dot{\omega}_{VM}$ auf und setzt dies in die zweite Zeile von (1) ein, so erhält man

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$i_i_0 J_{EM}\dot{\omega}_{GE} + (J_{VM} + i_0^2 J_{EM})\left(\dot{\omega}_{VM,ref} - \phi_{VM}(\tilde{\omega}_{VM}) - k_{VM}\int \tilde{\omega}_{VM}dt\right) = M_{VM} + i_0 M_{EM} \quad (13)$$

als zweite Bedingung für die Berechnung der Motormomente. Zusammengefasst liefern (11) und (13) den Trajektorienfolgeregler

$$\begin{pmatrix} M_{VM} \\ M_{EM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-i_0\kappa}{J_{VM} + i_0^2 J_{EM}} & J_{VM} & \frac{i_i_0 J_{EM} J_{VM}}{J_{VM} + i_0^2 J_{EM}} \\ \frac{\kappa}{J_{VM} + i_0^2 J_{EM}} & i_0 J_{EM} & \frac{i_i_0^2 J_{EM}^2}{J_{VM} + i_0^2 J_{EM}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{GE,ref} \\ \dot{\omega}_{VM,ref} - \phi_{VM}(\tilde{\omega}_{VM}) - k_{VM}\int \tilde{\omega}_{VM}dt \\ \hat{\dot{\omega}}_{GE} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

wobei $M_{GE,ref}$ der Sollverlauf des skalierten Antriebsmoments am Getriebeeingang ist und $\hat{\dot{\omega}}_{GE}$ dessen mit dem Beobachter aus Abschnitt 3.1 geschätzte Winkelbeschleunigung.

Die für den Regler (14) benötigten zueinander zeitlich synchronen Verläufe der Sollwinkelgeschwindigkeit $\omega_{VM,ref}$ und der Sollwinkelbeschleunigung $\dot{\omega}_{VM,ref}$ werden per Zustandsvariablenfilter [6] aus den von der überlagerten Steuerung gelieferten Sollverläufen für ω_{VM} generiert. Damit die Solltrajektorien bei Arbeitspunktwechseln näherungsweise symmetrisch sind, bietet sich eine Bessel-Charakteristik [7] für das Zustandsvariablenfilter an. Die resultierende Regelkreisstruktur ist in Bild 2 dargestellt.

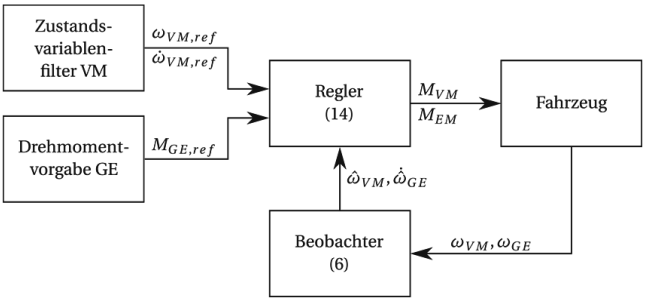


Bild 2: Regelkreis für die Steuerung des getriebeeingangseitigen Antriebsmoments und Regelung der Verbrennungsmotorgeschwindigkeit.

3.3 Regelung der Getriebeeingangs- und der Verbrennungsmotorgeschwindigkeiten

Soll simultan zur Drehgeschwindigkeit des Verbrennungsmotors auch die Drehgeschwindigkeit des Getriebeeingangs und somit die Längsgeschwindigkeit des Fahrzeugs geregelt werden, so kann der Regler aus Abschnitt 3.2 prinzipiell um einen überlagerten Regler für die Fahrzeuggeschwindigkeit erweitert werden, welcher das getriebeeingangsseitige Solldrehmoment $M_{GE,ref}$ berechnet. Die entsprechende Regelkreisstruktur ist in Bild 3 dargestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

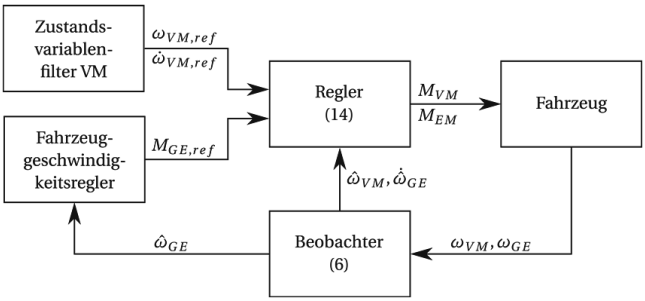


Bild 3: Erweiterung des Regelkreises aus Bild 2 um einen überlagerten Regler für die Fahrzeuggeschwindigkeit.

Wie bei kaskadierten Regelkreisen üblich, können beim Regler aus Bild 3 die Dynamiken des inneren Regelkreises (Verbrennungsmotorgeschwindigkeit) und des äußeren Regelkreises (Fahrzeug- bzw. Getriebeeingangsgeschwindigkeit) nicht unabhängig voneinander vorgegeben werden. Zur Vermeidung dieses Nachteils wird im Folgenden ein nicht-kaskadierter Mehrgrößenregler für die Getriebeeingangs- und Verbrennungsmotorgeschwindigkeit hergeleitet.

In Analogie zu (12) werden global asymptotisch stabile Dynamiken für die Trajektorienfolgefehler im geschlossenen Regelkreis vorgegeben, dieses Mal jedoch für beide Regelgrößen:

$$\dot{\tilde{\omega}}_i + \phi_i(\tilde{\omega}_i) + k_i \int \tilde{\omega}_i dt = 0, \;\; k_i \geq 0, x\phi_i(x) > 0 \forall x \neq 0, \;\; i = GE, VM, \tag{15}$$

mit $\tilde{\omega}_i \coloneqq \omega_i - \omega_{i,ref}$, wobei $\omega_{i,ref} \in \mathcal{C}^1$ die Solltrajektorie für ω_i ist. Aufösen von (15) nach $\dot{\omega}_{VM}$ bzw. $\dot{\omega}_{GE}$ und Einsetzen in (1) liefert den gesuchten Regler

$$\begin{pmatrix} M_{VM} \\ M_{EM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\dfrac{i_0 J_{GE}}{i_-} & J_{VM} & -\dfrac{i_0}{i_-} \\ \dfrac{J_{GE}}{i_-} + i_- J_{EM} & i_0 J_{EM} & \dfrac{1}{i_-} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\omega}_{GE,ref} - \phi_{GE}(\tilde{\omega}_{GE}) - k_{GE} \int \tilde{\omega}_{GE} dt \\ \dot{\omega}_{VM,ref} - \phi_{VM}(\tilde{\omega}_{VM}) - k_{VM} \int \tilde{\omega}_{VM} dt \\ M^*_{FZG} \end{pmatrix}. \tag{16}$$

Hier wird nur der bekannte Anteil M^*_{FZG} des Lastmoments kompensiert, um die Motormomente beim Bremsen des Fahrzeugs nicht zu stark ansteigen zu lassen; aus demselben Grund wird der Integralanteil $\int \tilde{\omega}_{GE} dt$ begrenzt. Die benötigten stetig differenzierbaren Sollgeschwindigkeiten und die zugehörigen zeitlich synchronen Beschleunigungen werden, wie in Abschnitt 3.2, mit Zustandsvariablenfiltern mit Bessel-Charakteristik errechnet. Bild 4 zeigt die entsprechende Regelkreisstruktur.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

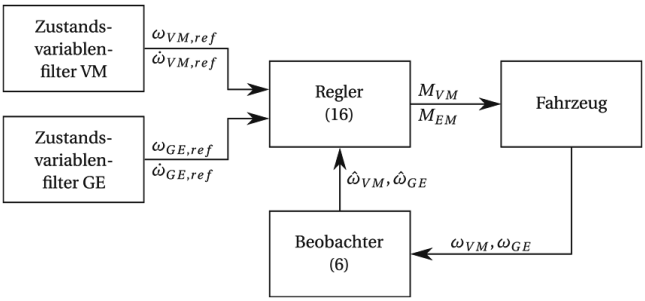


Bild 4: Regelkreis für die nicht-kaskadierte Regelung der Getriebeeingangs- und Verbrennungsmotorgeschwindigkeiten.

4. Simulationsergebnisse

Zum Vergleich der beiden Regler aus Abschnitt 3.3 wird ein Fahrzyklus betrachtet, bei dem der PKW aus dem Stand zunächst ankriecht (Zeitraum 3..5 s). D. h., die Drehzahl n_{GE} des Getriebeeingangs wird aus dem Stillstand auf 600 U/min beschleunigt, was einer Fahrzeuggeschwindigkeit von ca. 5 km/h entspricht. Anschließend wird das Fahrzeug langsam bis zum Stillstand abgebremst (Zeitraum 13..18 s), dann kriecht es wieder an (Zeitraum 23..25 s) und wird schließlich mit einer Vollbremsung zum Stehen gebracht (Zeitpunkt 33 s). Während des gesamten Manövers soll die Drehzahl n_{VM} des Verbrennungsmotors dem Sollwert $n_{VM,ref} \equiv 1000\,\mathrm{U/min}$ entsprechen. Insbesondere die Vollbremsung stellt wegen der dabei auftretenden großen Verzögerungen hohe Anforderungen an die Regelkreisdynamik.

Die von den Reglern angeforderten Drehmomente sowie die resultierenden Drehzahlverläufe und Regelabweichungen sind in den Bildern 5 (kaskadierter Regler aus Bild 3) bzw. 6 (nicht-kaskadierter Regler aus Bild 4) dargestellt. Man erkennt, dass beide Regler während des Ankriechens und des langsamen Abbremsens ein gutes Trajektorienfolgeverhalten erreichen, wobei die Regelgüte beim nicht-kaskadierten Regler besser als beim kaskadierten Regler ist. Während des kritischen Manövers, der Vollbremsung, ist ein deutlicherer Unterschied zwischen beiden Reglern zu sehen – hier ist die Regelabweichung infolge der Entkopplung der Fehlerdynamiken beim nicht-kaskadierten Regler wesentlich besser als beim kaskadierten Regler, bei dem die Fehlerdynamiken inhärent miteinander verkoppelt sind.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

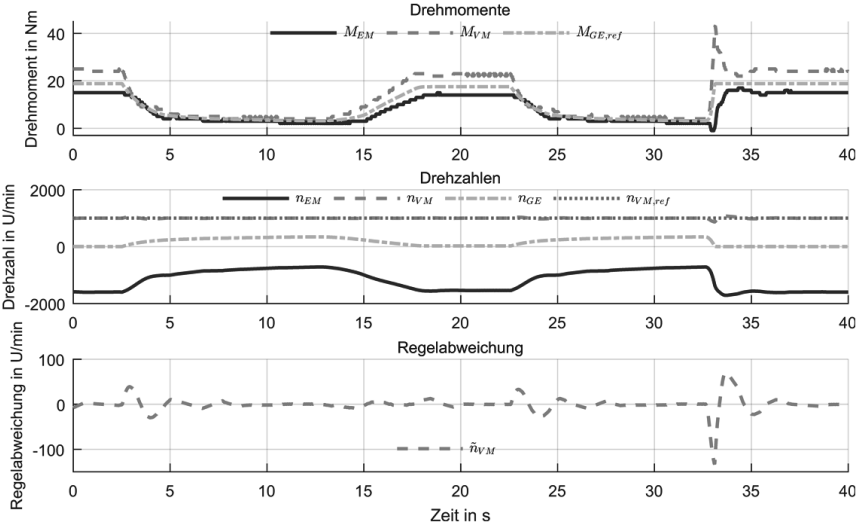


Bild 5: Simulationsergebnisse für den kaskadierten Regler.

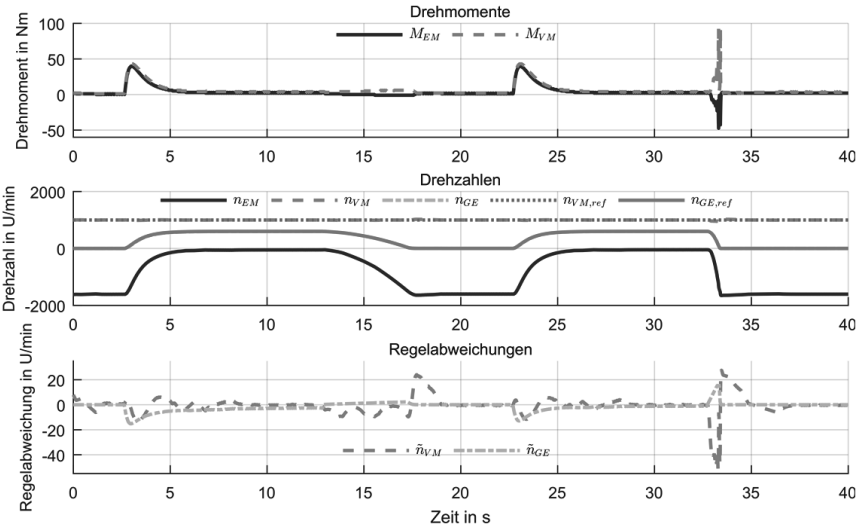


Bild 6: Simulationsergebnisse für den nicht-kaskadierten Regler.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Zusammenfassung

Obwohl der Beobachter aus Abschnitt 3.1 und die flachheitsbasierten Regler aus den Abschnitten 3.2 und 3.3 auf dem sehr einfachen mathematischen Modell des Planetenradsatzes aus Abschnitt 2 beruhen, zeigen die geschlossenen Regelkreise in der Fahrzeugsimulation ein sehr vielversprechendes Trajektorienfolgeverhalten. Wichtig hierbei ist, dass in der Berechnung der Stellgrößen nicht nur die Solldrehgeschwindigkeiten verwendet werden, sondern auch die hierzu gehörigen Solldrehbeschleunigungen. Soll auch die Fahrzeuggeschwindigkeit geregelt werden, so ist der nicht-kaskadierte Mehrgrößenregler infolge der Entkopplung der Fehlerdynamiken im Vergleich zum kaskadierten Regler zu bevorzugen. Die Entkopplung der Fehlerdynamiken vereinfacht außerdem die Applikation der Reglerparameter. Durch die Vorgabe nichtlinearer Fehlerdynamiken können die Regler in der Praxis an nicht explizit modellierte parasitäre Dynamiken angepasst werden.

Literatur:

[1] Bennett, W. R.: Spectra of quantized signals. Bell System Technical Journal 27 (1948) S. 446-472

[2] O'Reilly, J.: Observers for linear systems. London: Academic Press 1983

[3] Mikusiński, J.: Operational calculus, Vol. 1. 2. Auflage. Oxford: Pergamon Press 1983

[4] Rudolph, J.: Beiträge zur flachheitsbasierten Folgeregelung linearer und nichtlinearer Systeme endlicher und unendlicher Dimension. Aachen: Shaker Verlag 2003

[5] Slotine, J.-J. E.; Li, W.: Applied nonlinear control. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall 1991

[6] Isermann, R.; Münchhof, M.: Identification of dynamic systems. Berlin: Springer-Verlag 2011

[7] Thomson, W. E.: Delay networks having maximally flat frequency characteristics. Proc. IEEE – Part III: Radio and Communication Engineering 96 (1949) S. 487-490

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Adaptive Ermittlung des viskosen Reibmoments bei hydraulisch betätigten Nasskupplungen

Dr.-Ing. **A. Tarasow**, Dipl.-Ing. **T. Arndt**, Dipl.-Ing. **B. Neudecker**, Dipl.-Ing. **R. Serway**, IAV GmbH, Gifhorn/Berlin;
J.V.G. Tilly, B.Sc., Technische Universität Clausthal

Kurzfassung

Aufgrund der hydraulischen Kühlflüssigkeit zwischen den Kupplungslamellen bzw. des dadurch resultierenden viskosen Reibmoments beginnt bei Nasskupplungen die Drehmomentübertragung noch bevor ein mechanischer Kontakt zwischen den Reibflächen entsteht. Zur Erfüllung der hohen Anforderungen an die Kupplungssteuerung, ist es erforderlich, die Wirkung des viskosen Reibmoments bei Anfahr- und Schaltvorgängen zu berücksichtigen. In diesem Beitrag wird eine anwendungsoptimierte Modellierung des viskosen Reibmoments sowie die Identifikation der unbekannten Parameter dieses Modells vorgestellt. Neben der üblichen Berücksichtigung der Abhängigkeit des viskosen Reibmoments von der Differenzdrehzahl, berücksichtigt das entwickelte Modell die Änderung des Abstandes zwischen den Reibflächen sowie den Einfluss der Zentrifugalkraft und der Lagerreibung. Dies führt zu einer experimentell belegten signifikanten Erhöhung der Genauigkeit der Bestimmung des wirkenden viskosen Reibmoments.

Abstract

By virtue of the hydraulic fluid between the friction plates and the resulting viscous friction torque, the torque transmission by the clutch begins before the actual mechanical contact between the plates. It is necessary to consider the impact of the viscous friction torque during launch process and gear shifting to accomplish the high performance standards in clutch control. In this article an optimized model of wet friction clutches as well as the identification of the unknown parameters of this model is proposed. Beyond the dependency on the rotational speed difference of the viscous friction torque, this model also considers the distance between the clutch plates and the influence of the centrifugal force and the bearing friction. This leads to an experimentally verified increase in accuracy in the determination of the viscous friction torque.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1. Einleitung

Nasslaufende Reibungskupplungen spielen eine wichtige Rolle in automatisierten Antriebssträngen moderner Kraftfahrzeuge mit hoher Antriebsleistung. Derartige Kupplungen werden z.B. als Fahrkupplungen in Doppelkupplungsgetrieben oder als Trennkupplungen zwischen dem Verbrennungs- und Elektromotor in hybriden Antriebskonzepten eingesetzt. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Nasskupplung.

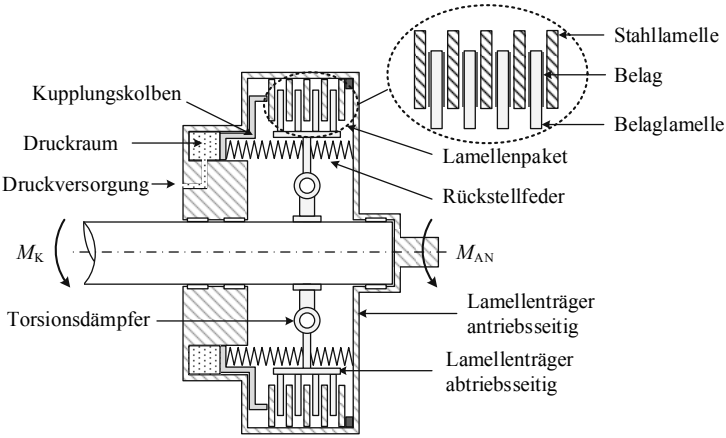


Bild 1: Prinzipieller Aufbau einer nasslaufenden, hydraulisch betätigten Reibungskupplung

Aufgrund des zur Kühlung eingesetzten hydraulischen Fluids zwischen den Stahl- und Belaglamellen bzw. des dadurch resultierenden viskosen Reibmoments (Schleppmoment) beginnt bei Nasskupplungen die Drehmomentübertragung noch bevor ein mechanischer Kontakt zwischen den Reibflächen entsteht. Unter bestimmten Voraussetzungen kann das viskose Reibmoment mehrere Nm betragen und muss daher bei Anfahr- und Schaltvorgängen berücksichtigt werden. Die Höhe des viskosen Reibmoments hängt sowohl von verschiedenen physikalischen Größen des Kupplungssystems als auch von den hydraulischen Eigenschaften des Kühlfluids ab. Die einfachsten Modelle nehmen eine lineare Abhängigkeit des viskosen Reibmoments von der Differenzdrehzahl zwischen den Oberflächen der Reiblamellen an. Weit verbreitet sind Modelle, die zusätzlich den Abstand zwischen den Lamellen bzw. die Höhe der Fluidschicht berück-sichtigen. So wird z.B. in [1] ein solches Modell zur Least-Square Schätzung des viskosen Reibmoments bei nasslaufenden Doppelkupplungsgetrieben im PKW eingesetzt. Dessen Eignung wird damit begründet, dass aufgrund der geregelten Zufuhr des Kühlfluids der Spalt zwischen den Oberflächen der Reiblamellen stets befüllt bleibt. Bei einer

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

konstanten Zufuhr des Kühlfluids sinkt hingegen der Grad der Spaltbefüllung mit steigender Differenzdrehzahl und auch die Konsistenz des Fluids ändert sich. Die Ursachen hierfür liegen in erster Linie in der Verringerung des Ölvolumens im Spalt aufgrund der Zentrifugalkraft sowie im Eindringen der Luft in das Kühlfluid (vgl. z.B. [2] - [8]). Die Ergebnisse von [6] zeigen, dass die genannten Effekte auch bei Nasskupplungen im PKW nicht vernachlässigt werden dürfen. Zur Nachbildung dieser Effekte wurden in der Vergangenheit verschiedene, phänomenologische Modelle, wie z.B. in [2] - [8], entwickelt. Allerdings weisen derartige Modelle, insbesondere bei Berücksichtigung der Geometrie der Lamellennutung ([7] - [8]) sowie des Taumelns der Lamellen bei hohen Differenzdrehzahlen, eine Komplexität auf, die die Verwendung dieser Modelle auf Seriensteuergeräten erschwert. Zwecks Reduktion der Modellkomplexität wird in diesem Beitrag eine funktionale Approximation des typischen Verlaufs der Abhängigkeit des viskosen Reibmoments von der Differenzdrehzahl vorgenommen.

Eine weitere Herausforderung bei der Bestimmung des viskosen Reibmoments stellt die Ermittlung des Lamellenabstandes, der einen großen Einfluss auf die Entstehung des viskosen Reibmoments hat (vgl. z.B. [10]), dar. Aufgrund der schlechten Zugänglichkeit ist eine mess-technische Ermittlung des Lamellenabstandes aufwendig und dessen Bestimmung mit Hilfe von Methoden der Zustandsschätzung führt meistens auf komplexe Algorithmen (vgl. [11], [12]). Für die Ermittlung des Lamellenabstandes wird in diesem Beitrag eine vereinfachte, auf den charakteristischen Werten des hydraulischen Druckes während des Betätigungsvorgangs basierende, Vorgehensweise vorgeschlagen. Weiterhin werden in dieser Arbeit bei der Ermittlung des viskosen Reibmoments die Einflüsse der Zentrifugalkraft, der Lagerreibung sowie des Volumenstroms des Kühlfluids berücksichtigt.

Ein wichtiger Aspekt der vorliegenden Untersuchungen liegt auf der Ermittlung eines für den Einsatz auf Steuergeräten geeigneten Modells mit geringer Komplexität bei gleichzeitig hoher Genauigkeit der Bestimmung des viskosen Reibmoments. Zu diesem Zweck wird die Abhängig-keit von der Differenzdrehzahl, dem Lamellenabstande, der Zentrifugalkraft, der Lagerreibung, sowie dem Volumenstroms des Kühlfluids nacheinander in das Modell aufgenommen und deren Auswirkung anhand realer Fahrzeugmessungen analysiert. Hierbei werden mit Hilfe der Levenberg-Marquardt Methode die Parameter identifiziert, die für die jeweilige Modellvariante und gegebene Messdaten eine im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate optimale Überein-stimmung zwischen Messdaten und Modell ergeben. Als Maß für diese Übereinstimmung wird für jede Modellvariante der quadratische Mittelwert (QMW) des Modellfehlers berechnet, welcher zum Vergleich der Modellvarianten untereinander verwendet wird.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Approximation der Differenzdrehzahlabhängigkeit

Bei geringen bis mittleren Differenzdrehzahlen ist der Spalt zwischen den Reibflächen der Kupplungslamellen vollständig mit Kühlfluid befüllt, sodass das viskose Reibmoment proportional zur Differenzdrehzahl ansteigt. In der Fachliteratur wird dieser Betriebszustand als die erste Phase der Differenzdrehzahlabhängigkeit des viskosen Reibmoments bzw. Flüssig-keitsphase genannt ([9]). Bei weiterem Anstieg der Differenzdrehzahl erfolgt eine deutliche Reduktion des viskosen Reibmoments aufgrund der Verringerung des Ölvolumens im Spalt zwischen den Reiblamellen sowie der Änderung der Konsistenz des Fluids. In diesem Betriebszustand bildet sich zunehmend die zweite Phase, die sogenannte Gasphase, aus. Mit weiter zunehmender Differenzdrehzahl beginnen die Kupplungslamellen zu taumeln und kommen sporadisch in Kontakt miteinander (vgl. [13]). Dies führt zum Anstieg des übertragenen Moments und kennzeichnet die dritte Phase der Differenzdrehzahlabhängigkeit des Schleppmoments, die bei dem beschriebenen Betriebszustand allerdings eine Mischung zwischen viskoser und mechanischer Reibung darstellt. Als Approximation des beschriebenen dreiphasigen Verlaufs der Abhängigkeit des Schleppmoments $M_V(k)$ von der Differenzdrehzahl wird die empirisch hergeleitete Approximationsfunktion

$$M_V(k) = \theta_1 \frac{\Delta\omega(k)}{h(p(k))} - \theta_2 \frac{\Delta\omega(k)}{h(p(k))} \left(\frac{0.5\theta_3(\Delta\omega(k) - \theta_4)}{\sqrt{1 + \left(\theta_3(\Delta\omega(k) - \theta_4)\right)^2}} + 0.5 \right) \tag{1}$$

eingesetzt. Die Bedeutung der Parameter θ_1 bis θ_4 ist anhand eines Beispielverlaufs der Differenzdrehzahlabhängigkeit für einen konstanten Wert des Lamellenabstandes h in Abbildung 2 dargestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

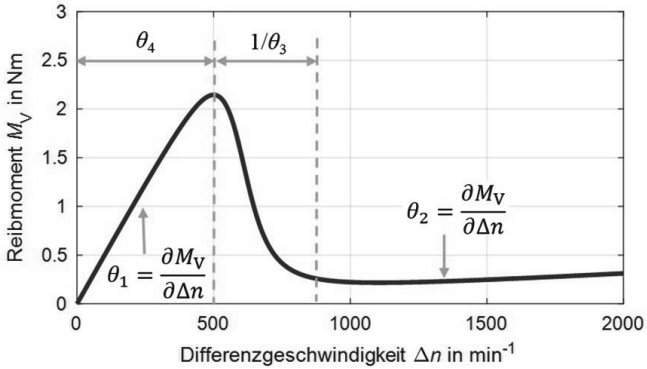


Bild 2: Bedeutung der Parameter der Approximationsfunktion nach Gl. (1) (dargestellt für ein konstantes h)

Der erste Summand in Gl. (1) dient der Approximation des ersten bzw. der zweite Summand der Approximation der zweiten und dritten Phase der Schleppmomentübertragung. Weiterhin repräsentieren $\Delta\omega(k)$ die Differenzwinkelgeschwindigkeit zwischen den Reiblamellen zum Zeitpunkt k und $h(p(k))$ den von dem hydraulischen Druck $p(k)$ abhängigen Lamellenabstand.
In Kapitel 5 werden die Parameter der Gl. (1) anhand realer Fahrzeugmessungen identifiziert und zur Nachbildung des zeitlichen Verlaufs des viskosen Reibmoments herangezogen.

3. Ermittlung des Lamellenabstandes

Bei hydraulisch betätigten Nasskupplungen sind der Abhebe- und der Anliegedruck als charakteristische Werte des Betätigungsdrucks der Kupplung von großer Bedeutung. Der Abhebedruck beschreibt dabei den Wert des hydraulischen Drucks bei dem die entgegen der Schließbewegung der Kupplung wirkenden Kräfte (Vorspannkraft der Rückstellfeder, Reibungskräfte, etc.) überwunden werden und der Kupplungskolben in Bewegung versetzt wird (vgl. Abbildung 1). Der Anliegedruck repräsentiert den hydraulischen Druck, bei dem die Oberflächen der Stahl- und Belaglamellen in Kontakt kommen und die Übertragung des mechanischen Reibmoments beginnt. In [14] wird ein effizientes Verfahren zur Ermittlung des Anliege- und Abhebedruckes während des Fahrbetriebs vorgestellt, sodass die Kenntnis dieser Werte vorausgesetzt werden kann. Da der Betätigungsdruck in den meisten nasslaufenden PKW-Kupplungen sensortechnisch erfasst wird, kann diese Größe zur Schätzung des Lamellenabstandes herangezogen werden. Dabei wird ausgenutzt, dass stationär nach Überwindung der Vorspannkraft $F_V = A\, p_{AB}$ und vor dem Erreichen des

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Anliegedrucks p_{AN} die hydraulische Schließkraft $F_H = A\,p$ und die von dem Weg des Kupplungskolbens x abhängige Kraft der Rückstellfeder F_R sich im Gleichgewicht befinden, sodass gilt

$$A(p(k) - p_{AB}) = F_R(x). \tag{2}$$

Damit kann im Druckbereich zwischen p_{AB} und p_{AN} der Weg des Kupplungskolbens zum Zeitpunkt k als

$$x(k) = F_R^{-1}\big(A(p(k) - p_{AB})\big) \tag{3}$$

bestimmt werden. Für eine lineare Weg-Kraft Charakteristik der Rückstellfeder ergibt sich für x

$$x(k) = \frac{A}{c}(p(k) - p_{AB}), \tag{4}$$

woraus folgende Berechnung des Lamellenabstands h resultiert

$$h(k) = h_{max} - \frac{A}{c}(p(k) - p_{AB}). \tag{5}$$

Aus Gl. (5) ist erkenntlich, dass für die Bestimmung des tatsächlichen Wertes des Lamellenabstands der maximale Abstand h_{max} sowie der Quotient A/c bekannt sein muss. Allerdings ist für die Berechnung des viskosen Reibmoments nach Gl. (1) bereits ein (z.B. auf h_{max}) normierter Lamellenabstand $\tilde{h}$ an Stelle des tatsächlichen Abstandes h völlig ausreichend, da der Normierungsfaktor in den zu identifizierenden Parametern θ_1 und θ_2 aufgenommen werden kann. Für den normierten Lamellenabstand ergibt sich somit die stückweise definierte Funktion

$$\tilde{h}(k) = \begin{cases} 1, & \text{für } \; p(k) < p_{AB} \\ \dfrac{p_{AN} - p(k)}{p_{AN} - p_{AB}}, & \text{für } \; p_{AB} \le p(k) < p_{AN} \\ 0, & \text{für } \; p(k) \ge p_{AN}. \end{cases} \tag{6}$$

Aufgrund der Vernachlässigung dynamischer Effekte sowie weiterer entgegen der Schließbewegung der Kupplung wirkender Kräfte liefert die Gl. (6) lediglich einen Schätzwert für den normierten Lamellenabstand $\tilde{h}$. Die Komplexität dieser Schätzung ist jedoch wesentlich geringer als bei Verwendung klassischer Schätzmethoden, wie z.B. in [11] und [12], und die Schätzung entspricht bei stationären Kupplungsdrücken der exakten Berechnung. Die Auswirkungen der Verwendung des normierten Lamellenabstandes zur Bestimmung des viskosen Reibmoments eines gegebenen Kupplungssystems werden in Kapitel 5 analysiert.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4. Berücksichtigung weiterer Effekte

Neben der Differenzdrehzahl und dem Lamellenabstand spielen drei weitere Einflussgrößen, das Kühlölvolumen im Lamellenpaket, die Zentrifugalkraft und die Lagerreibung, eine große Rolle bei der Bestimmung des viskosen Reibmoments. Da das Ölvolumen das viskose Reibmoment direkt beeinflusst und bei Abwesenheit des Kühlöls kein viskoses Reibmoment entstehen kann, wird es als eine multiplikative Erweiterung der Gl. (1) entsprechend

$$M_V(k) = \hat{V}(k)\left(\theta_1 \frac{\Delta\omega(k)}{\tilde{h}(p(k))} - \theta_2 \frac{\Delta\omega(k)}{\tilde{h}(p(k))}\left(\frac{0.5\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)}{\sqrt{1+\left(\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)\right)^2}}+0.5\right)\right) \tag{7}$$

berücksichtigt. Das zeitliche Verhalten des Kühlölvolumens innerhalb des Lamellenpakets wird hierbei durch das Verzögerungsglied 1. Ordnung

$$\hat{V}(k) = \theta_5 \hat{V}(k-1) + (1-\theta_5) Q_{Kuehl}(k), \tag{8}$$

mit dem Kühlölvolumenstrom Q_{Kuehl} als Eingangsgröße, approximiert. Dieser Approximation liegen folgende Überlegungen zu Grunde. Zum einen geht der Grad der Befüllung der Spalte zwischen den Lamellen mit steigendem Kühlölvolumenstrom in die Sättigung und erreicht 100%, zum anderen führt eine Abschaltung des Kühlölvolumenstroms erst nachdem das Kühlöl aus dem Lamellenpaket abgeflossen ist zum Verschwinden des viskosen Reibmoments. Beide Effekte werden durch die Approximation entsprechend Gl. (8) berücksichtigt.

Die Zentrifugalkraft wirkt über zwei Effekte auf das viskose Reibmoment. Zum einen steigt mit zunehmender Winkelgeschwindigkeit ω_P der Primärseite der Nasskupplung der dynamische Druck im Druckraum des Kupplungskolbens (vgl. [8]) und zum anderen bewirkt die Zentrifugalkraft das Herausschleudern des Kühlöls aus dem Spalt zwischen den Reiblamellen ([2] - [8]). Bei der Nachbildung des viskosen Reibmoments erfolgt die Berücksichtigung beider Effekte durch eine additive Erweiterung des Modells nach Gl. (7) entsprechend

$$M_V(k) = \hat{V}(k)\left(\theta_1 \frac{\Delta\omega(k)}{\tilde{h}(p(k))} - \theta_2 \frac{\Delta\omega(k)}{\tilde{h}(p(k))}\left(\frac{0.5\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)}{\sqrt{1+\left(\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)\right)^2}}+0.5\right)\right) + \theta_6\omega_P^2(k). \tag{9}$$

Die dritte für die Ermittlung des viskosen Reibmoments relevante Einflussgröße ist das Widerstandsmoment aufgrund der Reibung in den Lagern der an der Sekundärseite der Kupplung angeordneten Getriebeeingangswelle. Die Lagereibung wird als viskos angenommen. Für das zur Winkelgeschwindigkeit der Eingangswelle ω_S proportionale Reibmoment resultiert damit

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$M_R(k) = \theta_7 \omega_S(k). \tag{10}$$

Die Auswirkungen der Berücksichtigung des Kühlölvolumens im Lamellenpaket, der Zentrifugal-kraft sowie der Lagerreibung auf die Identifikation des viskosen Reibmoments werden in Kapitel 5 analysiert.

5. Identifikation der Modellvarianten

Die Identifikation des viskosen Reibmoments erfolgt basierend auf der Momentenbilanz an der Getriebeeingangswelle

$$J\dot{\omega}_S(t) = M_V(t) - M_R(t), \tag{11}$$

wobei die Variable J das Massenträgheitsmoment der Eingangswelle, M_V das viskose Reibmoment nach Gl. (1), Gl. (7) und Gl. (10) sowie M_R die Lagerreibung nach Gl. (9) repräsentieren. In zeitdiskreter Form mit dem Abtastintervall T lautet Gl. (11)

$$J\frac{\omega_S(k) - \omega_S(k-1)}{T} = M_V(k) - M_R(k). \tag{12}$$

Die Identifikation erfolgt anhand realer Messungen aus einem PKW mit nasslaufendem Doppel-kupplungsgetriebe. Da das Massenträgheitsmoment J aus Konstruktionsdaten genau bekannt ist und die Winkelgeschwindigkeit ω_S eine gemessene Größe repräsentiert, kann der Ausdruck

$$M_{Ref}(k) = J\frac{\omega_S(k) - \omega_S(k-1)}{T} \tag{13}$$

als Referenzgröße für die Identifikation verwendet werden. Da das zu identifizierende System nichtlinear in den Parametern θ_1 bis θ_7 ist, wird als Identifikationsalgorithmus ein gradientenbasiertes Verfahren mit gedämpfter Schrittweitensteuerung, die Levenberg-Marquardt Methode (vgl. z.B. [15]), eingesetzt. Zur Ausführung dieser Methode ist die Bestimmung des Gradienten des Modellfehlers

$$e(k) = M_{Ref}(k) - \big(M_V(k) - M_R(k)\big) \tag{14}$$

bzgl. des Parametervektors $\boldsymbol{\theta}$, in dem alle unbekannten Modellparameter zusammengefasst sind, erforderlich. Dieser ergibt sich zu

$$\boldsymbol{j}(k) = \frac{de(k)}{d\boldsymbol{\theta}^T} = -\frac{d\big(M_V(k) - M_R(k)\big)}{d\boldsymbol{\theta}^T}. \tag{15}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Mit dem Fehler e nach Gl. (14) und Gradienten $\boldsymbol{j}$ nach Gl. (15) lässt sich der Korrekturschritt zur Anpassung des im Iterationsschritt n-1 geschätzten Parametervektors $\widehat{\boldsymbol{\theta}}$ als

$$\Delta\boldsymbol{\theta}_n = -\left[\sum_{i=1}^{N} \alpha(i)\boldsymbol{j}(i)\boldsymbol{j}^T(i) + \delta_n \boldsymbol{I}\right]^{-1} \sum_{i=1}^{N} \alpha(i)\boldsymbol{j}(i)e(i), \tag{16}$$

berechnen und der Schätzwert des Parametervektors in dem Iterationsschritt n als

$$\widehat{\boldsymbol{\theta}}_n = \widehat{\boldsymbol{\theta}}_{n-1} + \Delta\boldsymbol{\theta}_n. \tag{17}$$

Wie einleitend erwähnt, sollen in dieser Arbeit die Einflüsse einzelner in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellter Effekte auf die Genauigkeit der Nachbildung des viskosen Reibmoments analysiert werden. Zu diesem Zweck werden diese Effekte nacheinander in das Modell aufgenommen und das resultierende Modell bei Verwendung der Levenberg-Marquardt Methode an reale Fahrzeugmessdaten angepasst. Auf diese Weise ergeben sich sechs in der Tabelle 1 zusammengefassten Varianten der rechten Seite des zu identifizierenden Modells nach Gl. (12). Zu den einzelnen Modellvarianten ist in der Tabelle 1 die prozentuale Änderung des nach der Identifikation resultierenden quadratischen Mittelwerts angegeben. Diese Änderung bezieht sich stets auf die vorangegangene Modellvariante, sie stellt einen Durchschnitt über mehrere Versuchsreihen dar und kann als Maß für die quantitative Verbesserung der Nachbildung des viskosen Reibmoments mit Berücksichtigung des jeweiligen Effekts aufgefasst werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 1: Die rechten Seiten des zu identifizierenden Modells nach Gl. (12)

1	$\theta_1 \Delta\omega(k)$	ΔQMW in [%]
2	$\theta_1 \Delta\omega(k) - \theta_2 \Delta\omega(k) \left(\frac{0.5\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)}{\sqrt{1+\left(\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)\right)^2}} + 0.5 \right)$	-29% rel. zu 1
3	$\theta_1 \frac{\Delta\omega(k)}{\tilde{h}(p(k))} - \theta_2 \frac{\Delta\omega(k)}{\tilde{h}(p(k))} \left(\frac{0.5\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)}{\sqrt{1+\left(\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)\right)^2}} + 0.5 \right)$	-13% rel. zu 2
4	$\hat{V}(k) \left(\theta_1 \frac{\Delta\omega(k)}{\tilde{h}(p(k))} - \theta_2 \frac{\Delta\omega(k)}{\tilde{h}(p(k))} \left(\frac{0.5\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)}{\sqrt{1+\left(\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)\right)^2}} + 0.5 \right) \right)$	-20% rel. zu 3
5	$\hat{V}(k) \left(\theta_1 \frac{\Delta\omega(k)}{\tilde{h}(p(k))} - \theta_2 \frac{\Delta\omega(k)}{\tilde{h}(p(k))} \left(\frac{0.5\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)}{\sqrt{1+\left(\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)\right)^2}} + 0.5 \right) \right) + \theta_6 \omega_P^2$	-17% rel. zu 4
6	$\hat{V}(k) \left(\theta_1 \frac{\Delta\omega(k)}{\tilde{h}(p(k))} - \theta_2 \frac{\Delta\omega(k)}{\tilde{h}(p(k))} \left(\frac{0.5\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)}{\sqrt{1+\left(\theta_3(\Delta\omega(k)-\theta_4)\right)^2}} + 0.5 \right) \right) + \theta_6 \omega_P^2 - \theta_7 \omega_S(k)$	-8% rel. zu 5

Aus der Tabelle 1 ist zu erkennen, dass durch die Hinzunahme der einzelnen Effekte eine signifikante Verbesserung der Nachbildung des viskosen Reibmoments durch das jeweilige Modell erzielt werden kann. Aus den untersuchten Modellvarianten liefert somit die Variante 6 den kleinsten absoluten Wert des mittleren Quadrates der Abweichung (vgl. Gl. (14)) zwischen der Messung und dem Modell. Abbildung 3 zeigt die zeitlichen Verläufe der für die Identifikation verwendeten Referenzgröße M_{Ref} (vgl. Gl. (13)) und die mit der identifizierten Modellvariante 1 bzw. 6 nachgebildeten Verläufe. Weiterhin zeigt Abbildung 4 die reale und identifizierte Abhängigkeit des viskosen Reibmoments von der Differenzdrehzahl. Die Bestimmung der als real angenommenen Differenzdrehzahlabhängigkeit erfolgt durch „Bereinigung“ des nach Gl. (13) bestimmten Referenzmoments M_{Ref} um die restlichen bei der Modellvariante 6 berücksichtigten Effekte gemäß

$$M_{V,Real}(k) = \left(M_{Ref}(k) - \theta_6 \omega_P^2(k) + \theta_7 \omega_S(k) \right) \frac{\tilde{h}(p(k))}{\hat{V}(k)}. \tag{18}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Zur Darstellung der modellierten Differenzdrehzahlabhängigkeit, ohne Einflüsse des Lamellenabstandes, des Kühlölvolumenstroms, der Zentrifugalkraft sowie der Lagereibung, wird die Modellvariante 2 entsprechend Tabelle 1 verwendet.

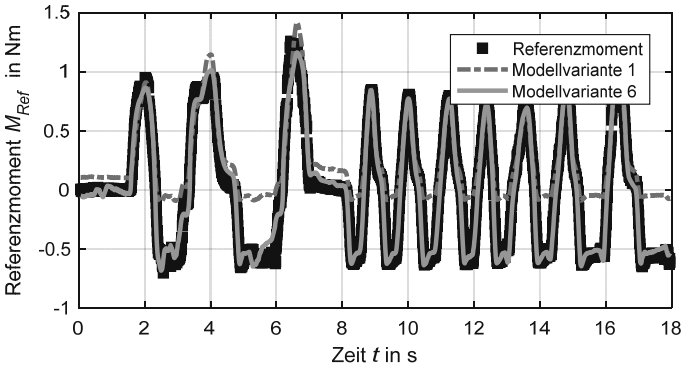


Bild 3: Zeitliche Verläufe des gemessenen Referenzmoments und identifizierter Modellvarianten 1 und 6

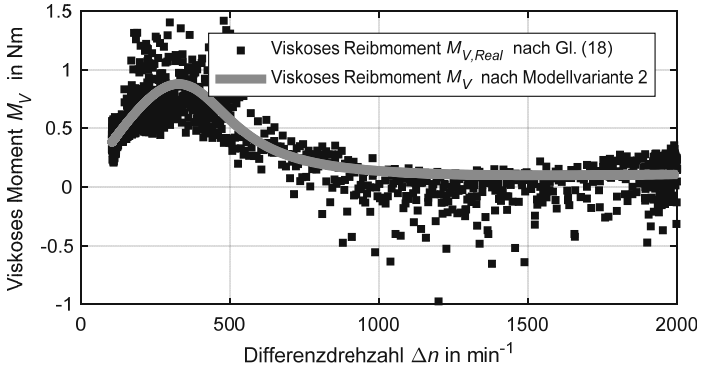


Bild 4: Reale und modellierte Abhängigkeit des viskosen Reibmoments von der Differenzdrehzahl

Aus den Abbildungen 3 und 4 ist ersichtlich, dass unter Verwendung der Modellvariante 6 eine hohe Genauigkeit der Nachbildung des viskosen Reibmoments der betrachteten Nasskupplung erzielt werden kann. Den wesentlichen Beitrag (vgl. Tabelle 1) zur Erhöhung

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

der Modell-genauigkeit liefert die Berücksichtigung der deutlich erkennbaren Reduktion des viskosen Reibmoments (vgl. Abbildung 4) mit zunehmender Differenzdrehzahl.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Beitrag wurde die Entwicklung eines Modells zur Nachbildung des viskosen Reibmoments nasslaufender Fahrzeugkupplungen sowie die Identifikation unbekannter Modell-parameter anhand realer Fahrzeugmessungen vorgestellt. Das entwickelte Modell zeichnet sich im Wesentlichen durch die Approximation der Abhängigkeit des viskosen Reibmoments von der Differenzdrehzahl, durch eine vereinfachte Schätzung des Lamellenabstandes und durch die Berücksichtigung der Einflüsse der Fliehkraft und der Lagerreibung, aus. Durch die vor-genommenen Vereinfachungen konnte die Modellkomplexität gering gehalten und dadurch die prinzipielle Eignung des Modells für den Einsatz auf Seriensteuergeräten erreicht werden. Trotz der Modellvereinfachungen belegen die erzielten Ergebnisse eine reproduzierbar hohe Genauigkeit der Nachbildung des viskosen Reibmoments. Dies ermöglicht eine präzise Berück-sichtigung dieses Effekts sowohl bei Anfahr- und Schaltvorgängen als auch bei der Adaption des Eingriffspunktes.

In weiteren Untersuchungsschritten zu dem behandelten Thema sollen die Abhängigkeiten des viskosen Reibmoments von der Temperatur des Kühlfluids modelliert und identifiziert werden. Anschließend soll der Identifikationsalgorithmus dahingehend angepasst werden, dass die Ermittlung der Parameter für die Nachbildung des viskosen Reibmoments auf einem Serien-steuergerät im Fahrzeug durchgeführt werden kann.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[1] Li, H., Lu, T., Zhang, J. (2016). Online estimation of clutch drag torque in wet dual clutch transmission based on recursive Least Squares. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*. 7:1229-73.

[2] Kato, Y., Murasugi, H., Hirano, H., Shibayama T. (1993). Fuel Economy Improvement through Tribological Analysis of the Wet Clutches and Brakes of an Automatic Transmission. *Society of Automotive Engineers of Japan*. 12:57-60.

[3] Yuan, Y., Liu, E., A., Hill J., Zou, Q. (2007). An Improved Hydrodynamic Model for Open Wet Transmission Clutches. *Journal of Fluids Engineering*. 3: 333-37.

[4] Hu, J., Peng, Z., Yuan, S. (2009). Drag torque prediction model for the wet clutches. C*hinese journal of mechanical engineering*. 2:238-43.

[5] Li, H., Jing, Q., Ma, B. (2012). Modeling and parametric study on drag torque of wet clutch. *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*. Beijing. 21-30.

[6] Zhou,X., Walker, P., Zhang, N., Zhu, B., Ruan, J. (2014). Numerical and experimental investigation of drag torque in a two-speed dual clutch transmission. *Mechanism and Machine Theory*. 9:46-63.

[7] Aphale, C. R., Cho, J., Schultz, W. W., Ceccio, S. L., Yoshioka, T., Hiraki, H. (2006). Modeling and parametric study of torque in open clutch plates. *Proceedings of the ASME/STLE International Joint Tribology Conference*. Long Beach, Ca. 1009-18.

[8] Rao, G. (2012). *Modellierung und Simulation des Systemverhaltens nasslaufender Lamellenkupplungen*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 751. Düsseldorf: VDI (Dissertation TU-Dresden).

[9] Takagi, Y., Nakata, H., Okano, Y., Miyagawa, M., Katayama, N. (2011). Effect of two-phase flow on drag torque in a wet clutch. *Journal of Advanced Research in Physics*. 2:1-5.

[10] Ma, L., Xiang, C., Du, M., Zhang, J. (2016). Research on the towing torque and friction performance of hydro-viscous clutch with different friction materials. *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Harbin. 381-86.

[11] Zhong, Y., Wyns, B., Dutta, A., Ionescu, C.-M., Pinte, G., Symens, W., Stoev, J., De Keyser, R. (2012). Position and velocity predictions of the piston in a wet clutch system during engagement by using a neural network modeling. *Proceedings of the 8th AIAI Conference*. Halkidiki. 474-82.

[12] Tarasow, A., Bohn, C., Vinaske, M., Wachsmuth, G. and Serway, R. (2010). Model-based estimation of the torque characteristics of an automated dual-clutch transmission in wet technology. *Proceedings of the 6th IFAC Symposium Advances in Automotive Control.* München. 455–60.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[13] Schulz, J. (2011). Separating springs for active separation of the friction plates in wet clutch systems. *Proceedings of the 10th International CTI Symposium Innovative Automotive Transmissions, Hybrids & Electric Drives*. Berlin.

[14] Tarasow, A., Bohn, C., Wachsmuth, G., Serway, R., Eisbach, M., Zhao, Q., Bauer, G. (2012). Method for identification of the kiss point as well as takeoff point of a hydraulically actuated friction clutch. *Proceedings of the SAE World Congress (Special Publication 2334)*. Detroit. 29–38.

[15] Madsen, K., Nielsen, H. B., Tingleff, O. (2004). *Methods for non-linear least squares problems*. Technical report of the Department of Informatics and Mathematical Modelling. Technical University of Denmark. Kongens Lyngby.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Analyse einer neuen kaskadierten Reglerstruktur für die Antriebsschlupfbegrenzung hochdynamischer Fahrzeugantriebe

Ansatz zur Dämpfung von Torsionsschwingungen im Antriebsstrang

M.Sc. **Alexander Zech**, Dr.-Ing. **Thomas Eberl**,
BMW Group, München;
Prof. Dr.-Ing. **Steffen Müller**, TU Berlin

Kurzfassung

Bei einer elastischen Verbindung zwischen Motor und Rad können während des Antriebsschlupfregelvorgangs teils sehr hohe Torsionsschwingungen auftreten [1]. Diese belasten Bauteile wie Motorlager und Antriebswellen und reduzieren den Fahrkomfort. Aus diesem Grund wird ein Regelungsansatz zur Reduktion dieser Torsionsschwingungen vorgestellt. Zunächst erfolgen theoretische Betrachtungen zur Dämpfungswirkung des Ansatzes auf den Antriebsstrang. Anschließend folgen experimentelle Untersuchungen anhand von Fahrversuchen, die eine Schwingungsreduktion bestätigen.

Abstract

An elastic connection between Motor and wheel result in high torsional oscillations during anti slip control [1]. These oscillations stress engine mounts and axles and reduce driving comfort significantly. Hence a control algorithm is presented which reduces torsional vibrations in the drive shaft through active damping. First the damping effect of the controller upon the system is discussed theoretically. In addition experimental results of the controller are presented which prove the damping functionality.

1. Einleitung

Die Antriebsschlupfregelung (ASR) ist eine Teilfunktion der Fahrdynamikregelung mit dem Ziel, die angetriebenen Räder bei Haftungsabriss auf einen optimalen Schlupf einzuregeln, um bestmögliche Traktion zu gewährleisten. Die in der Automobilindustrie etablierte Umsetzung dieser Funktion basiert auf der Partitionierung der gesamten Fahrdynamikregelung auf einem eigenen Steuergerät [2]. Die Stellgröße Antriebsdrehmomentbegrenzung wird mit ei-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

ner Signallatenz über einen BUS an das Motorsteuergerät kommuniziert, welches dann vom Motor umgesetzt wird. Dies gilt für sämtliche Antriebstopologien. Die beschriebene Struktur wurde ursprünglich für Verbrennungsmotoren mit trägem Ansprechverhalten entwickelt. Neuste Entwicklungen in der Antriebstechnologie befassen sich mit hochaufgeladenen Verbrennungsmotoren, die über elektronisch gesteuerte Aktoren eine erhöhte Dynamik gegenüber ihren Vorgängern aufweisen. Auch E-Maschinen haben einen breiten Einzug in das moderne Automobil gefunden, welche eine nochmals gesteigerte Dynamik besitzen.
Dadurch stößt das historisch gewachsene Regelungskonzept an seine Grenzen bzw. das volle Potential kann nicht ausgeschöpft werden. Im Zuge dessen wird ein neuer Ansatz entwickelt, um die durch technologischen Fortschritt entstandene Lücke zu schließen. Kern des Ansatzes ist die modulare Trennung der Funktionsmodule Sollwertgenerierung und aktuatornahe Regelung. So kann eine niedrigdynamische Führungsgröße (Drehzahl) als Sollwert verwendet und zwischen den Funktionsmodulen ausgetauscht werden, wobei eine kaskadierte Struktur des Gesamtregelkreises entsteht, siehe Abbildung 1. Im Folgenden wird der neue kaskadierte Ansatz als Drehzahlregler bezeichnet.

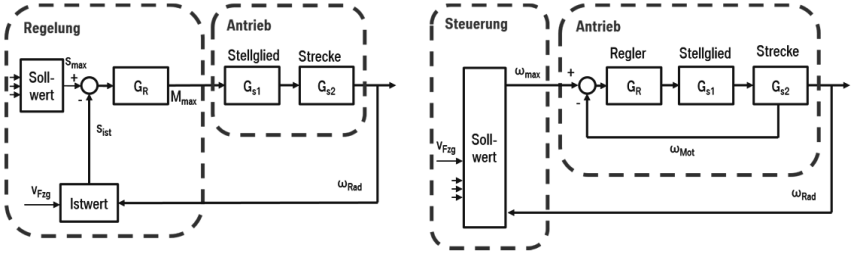


Bild 1: Schematische Darstellung der Reglerstruktur für die Radschlupfbegrenzung. Links: Klassische Umsetzung. Rechts: Neuer kaskadierter drehzahlbasierter Ansatz

Die neue Struktur der Radschlupfbegrenzung erlaubt es, den Maximalschlupf dynamischer und mit geringerer Abweichung einzuregeln. Dies äußert sich in einer höheren mittleren Beschleunigung sowie gesteigerten Fahrkomfort und erhöhter Fahrsicherheit.
Ein den Komfort beeinträchtigender Effekt, der vor allem im grenzstabilen Schlupfbereich auftritt, sind starke Torsionsschwingungen im Antriebsstrang (ATS). Durch den Fahrbahn-Reifen-Kontakt angeregt, beginnen die Räder in der Eigenfrequenz des elastischen ATS zu schwingen, siehe Abbildung 6, oben links. Dies induziert Schwingungen der Gesamtfahrzeug-beschleunigung, siehe Abbildung 6, unten links. Aufgrund des Frequenzspektrums ge-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

hören sie zu den von den Insassen fühlbaren Schwingungen und haben einen komfortbeeinträchtigenden Effekt [4,11].
In diesem Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, das entstehende Torsionsschwingungen im ATS während der Regelung des Antriebsschlupfs dämpft. Dazu wird zunächst der Inhalt des Beitrages in den wissenschaftlichen Kontext gebracht und die vorhandene Forschungslücke aufgezeigt. Im Anschluss werden das zugrunde gelegte Modell sowie der Reglerentwurf beschrieben. Es folgen experimentelle Untersuchungen anhand eines Versuchsträgers.

2. Grundlagen

Die aktive Dämpfung von Torsionsschwingungen in Antriebssystemen ist ein in der Literatur vielfältig behandeltes Thema [*3*]. Speziell in der Automobilindustrie gibt es zahlreiche Publikationen zur Dämpfung von Torsionsschwingungen im ATS. Hier wird vor allem auf das Ziel einer Reduktion von Fahrzeuglängsschwingungen eingegangen, welche den Fahrkomfort beeinträchtigen. In [4] wird der Schlupf im Reifen Fahrbahnkontakt dabei vernachlässigt. Weitere Arbeiten berücksichtigen den Schlupf, jedoch nur im linearen Bereich [*5,6*]. Neuste Veröffentlichungen zielen auf die Dämpfung von Torsionsschwingungen im grenzstabilen Bereich ab. In [*7,8*] werden Dämpfungsregler für eine ABS-Bremsung untersucht, wobei jedoch ausschließlich Ergebnisse aus Simulationen präsentiert werden. In [1] werden theoretische Untersuchungen aufgestellt, um das Verhalten von Torsionsschwingungen elektrischer Einzelradantriebe in Bezug auf Traktion zu charakterisieren. Im Gegensatz dazu sind Arbeiten, die sich mit experimentellen Untersuchungen zur Dämpfung von Torsionsschwingungen, die im Antriebsfall im grenzstabilen Schlupfbereich auftreten, nicht bekannt. Ebenso wurde in bisherigen Arbeiten dazu der Einfluss auf Schwingungen der Gesamtfahrzeugbeschleunigung vernachlässigt, welcher in diesem Beitrag diskutiert wird.

3. Untersuchtes Fahrzeugkonzept

Das Versuchsfahrzeug besitzt einen konventionellen Frontmotor, welcher als ein direkteinspritzender, Bi-Turbo aufgeladener Ottomotor ausgeführt ist. Über Kupplung, Handschaltgetriebe, Differential und Wellen wird die Hinterachse angetrieben. Eine schematische Darstellung des Antriebs ist Abbildung 2 zu entnehmen.
Zur prototypischen Darstellung von Funktionen wurde eine Schnittstelle (MABX) zum Motorsteuergerät (MSG) geschaffen, womit das Motorsollmoment beeinflusst werden kann. Dadurch kann der neue Ansatz der Antriebsschlupfregelung als Drehzahlregelung des Antriebs realisiert werden, vgl. Abbildung 1. Die Aufschaltung des Momentes aus der Schwin-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

gungsdämpfung wird über den Zündungspfad durch Variation des Zündwinkels aufgeprägt. Somit ist eine schnelle Umsetzung des geforderten Moments gewährleistet.

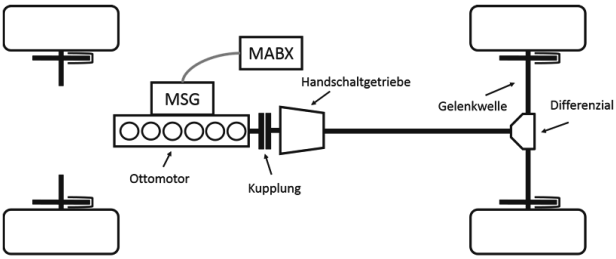


Bild 2: Antriebsstrangschema des Versuchsfahrzeuges

4. Modellierung der Streckendynamik

Für die Reglersynthese wird ein vereinfachtes Modell vom ATS des Versuchsfahrzeugs erstellt. Abbildung 3 zeigt das linearisierte Modell der Regelstrecke. Die Motordynamik wird unter Approximation der Totzeit als PT_2-Glied dargestellt [9]. Der ATS wird durch einen Zweimassenschwinger abgebildet. Als schwingfähig gestalten sich hierbei die rotatorische Trägheit des Motors J_{Mot} sowie die der Räder J_{Rad}. Die Räder besitzen aufgrund des Differenzials zwei Freiheitsgrade, werden jedoch durch ein vereinfachtes Modell zu einem Rad zusammengefasst, da lediglich längsdynamische Effekte untersucht werden. Motor und Rad sind über zwei Getriebe mit der Gesamtübersetzung i_{ges} sowie einer Feder mit der Steifigkeit c_{Welle} und einen Dämpfer mit der Dämpfung d_{Welle} verbunden.

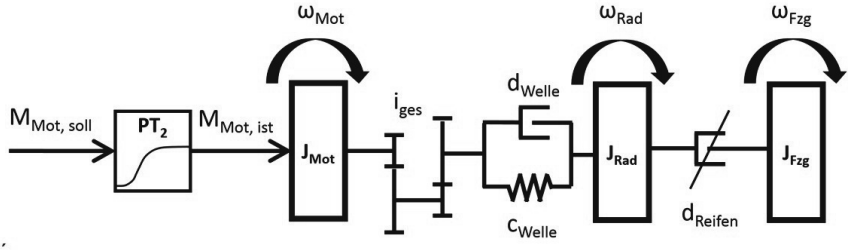


Bild 3: LPV-Modell der Regelstrecke

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Widerstandskraft im Fahrbahn-Reifen-Kontakt ist um den Arbeitspunkt während der Schlupfregelung stark nichtlinear [10]. Für ein lineares Modell, das für den Reglerentwurf sowie zur Analyse mit linearer Systemtheorie geeignet ist, wird der in [7] vorgestellte Ansatz mithilfe eines Linear-Parameter-Varying (LPV) Modells verwendet. Hier wird das Verhalten des Radschlupfes über eine Dämpfung d_{Reifen} zwischen Rad und Fahrzeug modelliert, wobei das Fahrzeug als rotatorische Masse J_{Fzg} aufgefasst wird. Die Dämpfung ist ein über den Betriebsbereich variierender Parameter und abhängig von Fahrzeuggeschwindigkeit und Reifenschlupf. Die Zustände ω beschreiben jeweils die Torsionsgeschwindigkeit der Trägheiten.

Das Modell bildet torsionale Schwingungen im Antriebsstrang sowie das nichtlineare Reifenverhalten ab. Dadurch lassen sich Simulationen für das Antriebsstrangverhalten in Abhängigkeit des Reifenschlupfs bei längsdynamischen Manövern durchführen. Eine Verifikation des Modells wurde durchgeführt sowie alle Parameter anhand von Identifikationsmessungen bestimmt. Da der Fokus auf experimentellen Ergebnissen der Schwingungsdämpfung beruht, soll an dieser Stelle nicht näher auf das Modell eingegangen werden. Es dient lediglich zur Synthese und Analyse von Reglern.

5. Entwurf eines Dämpfungsreglers

Für eine Regelung im Fahrzeug stehen nur wenige durch Sensoren erfasste Messgrößen zur Verfügung. Das schränkt die Auswahl von Reglerstrukturen ein. Aus diesem Grund wird ein Ansatz gewählt, der ausschließlich gemessene Signale verwendet, somit wird eine aufwändige Zustandsschätzung nicht benötigt. Es werden sowohl die Drehzahl der angetriebenen Räder als auch eine auf die angetriebene Achse skalierte Motordrehzahl $\omega_{Mot,skaliert}$ zurückgeführt [1,7]. Die Differenz der beiden Signale wird gewichtet auf das Reglermoment M_{Regler} addiert.

Der Signalflussplan der Integration des Dämpfungsreglers (braun hervorgehoben) in das bestehende Drehzahlregelungskonzept wird in Abbildung 4 gezeigt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird hier auf den verwendeten Drehzahlregler nicht näher eingegangen, da der Fokus dieses Beitrages in der Dämpfungsregelung liegt. Ebenso wird die Aktivierung des Reglers nicht weiter erläutert. Ferner ist davon auszugehen, dass während eines Schlupfregelvorgangs der Fahrer mehr Moment fordert, als der Regler stellt:

$$M_{Fahrer} > M_{Regler} \tag{1}$$

Dadurch geht das Reglermoment unbeeinflusst als Stellgröße in die Strecke ein. Es folgt:

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$M_{Mot,soll} = M_{Regler} \tag{2}$$

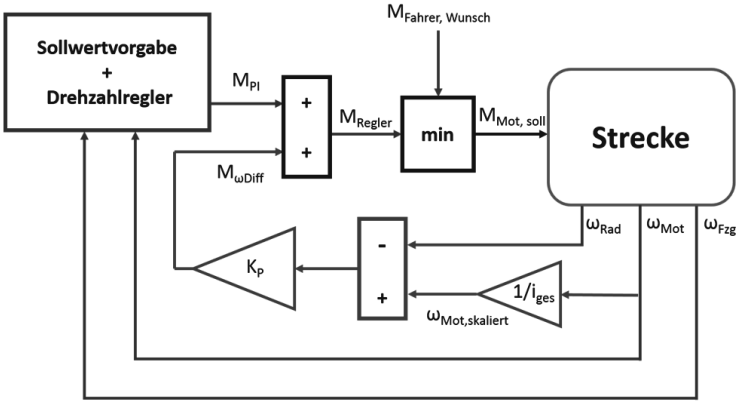


Bild 4: Signalflussplan der Differenzdrehzahlaufschaltung mit überlagerter Drehzahlregelung

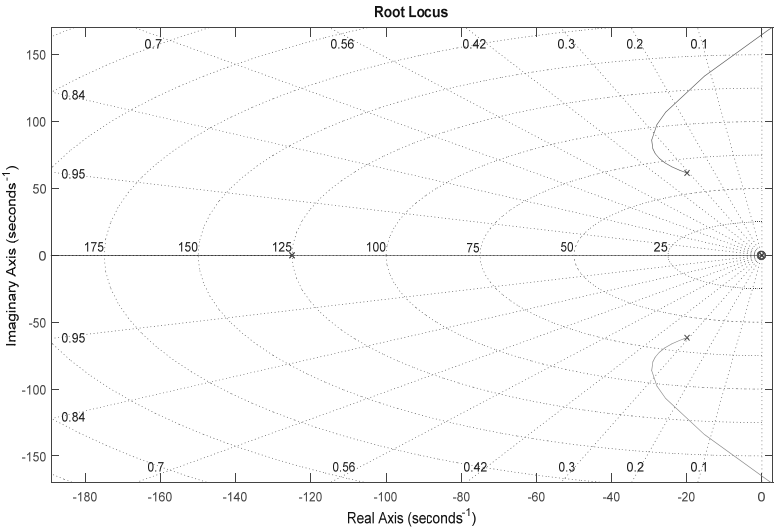


Bild 5: Wurzelortskurve der im Arbeitspunkt linearisierten Strecke mit Differenz-drehzahlaufschaltung

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Zur Analyse des Dämpfungsreglers wird die Wurzelortskurve (WOK) für Verstärkungen des Faktors K_p der Differenzdrehzahlaufschaltung um den Arbeitspunkt der Schlupfregelung erstellt, siehe Abbildung 5. Für das Gesamtsystemverhalten sind die dominanten Pole nahe der Realachse maßgeblich. In diesem Fall befinden sie sich für $K_p = 0$ bei ungefähr (-20 | +/-70i). Ein weiterer Pol liegt im Ursprung und ist durch das integrierende Verhalten der Drehzahlen zu erklären. Geraden für eine konstante Dämpfung verlaufen im Ursprung beginnend radial nach außen. Ausgehend von der Strecke ohne Differenzdrehzahl-aufschaltung ($K_p = 0$) nimmt die Systemdämpfung mit steigender Verstärkung zunächst zu. Dies ist am Verlauf der dominanten komplexen Polpaare zu sehen. Für eine steigende Verstärkung von K_p, nähern sich die Pole der Dämpfungsgerade von 0,42. Bei Verstärkungen > 50 kehrt der Verlauf jedoch wieder um und die WOK nähert sich der Realachse, um ab > 800 instabil zu werden.
Die theoretische Untersuchung zeigt, dass mithilfe des Ansatzes einer Differenzdrehzahlaufschaltung eine steigende Systemdämpfung erzielt werden kann. Durch Variation des einen Freiheitsgerades kann das Systemverhalten jedoch nicht unbegrenzt beeinflusst werden.

6. Experimentelle Ergebnisse im Fahrversuch

Die theoretischen Ergebnisse sollen auch im Fahrversuch bestätigt werden. Dazu wird der Ansatz zur Schwingungsdämpfung in die kaskadierte Drehzahlregelung des Versuchsfahrzeugs integriert, siehe Abbildung 4. Die Versuchsdurchführung erfolgt auf nassem Asphalt auf einer ebenen Fahrbahn. Es werden im Wechsel Versuche mit inaktiver und aktiver Differenzdrehzahlaufschaltung durchgeführt. Diese gestalten sich durch Fahrpedal-TipIns aus konstanter Geschwindigkeit im 2. Gang. Dadurch wird schlagartig das maximal mögliche Moment gefordert. Aufgrund niedrigen Reibwertes kommt es zwangsweise zu einem Haftungsabriss der angetriebenen Räder, sodass die Drehzahlregelung aktiv wird. Da ausschließlich das Längsdynamische Verhalten von Interesse ist, wird ein Lenkwinkel von 0° eingestellt, sodass eine Geradeausfahrt realisiert wird. Die Drehzahlgrenze ω_{max} aus Abbildung 1 wird auf ca. 8% Schlupf eingestellt. Dieser befindet sich nahe der maximalen Traktion und wurde experimentell ermittelt. Ebenso wurden die Reglerparameter des Drehzahlreglers sowie der Faktor K_p der Differenzdrehzahlaufschaltung zuvor anhand von Fahrversuchen eingestellt.
Es zeigt sich, dass K_p im Fahrversuch bis ca. 150 einen dämpfungssteigernden Effekt bewirkt. Anhand des verwendeten Entwurfsmodells ist dies jedoch nur bis Werte um 50 der Fall. Somit ergibt sich zwar eine Diskrepanz zwischen Modell und Fahrversuch, der eigentliche Charakter bleibt in der Abbildung der Realität jedoch erhalten. Somit lässt sich das Modell für grundsätzliche Untersuchungen heranziehen.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse aus zwei Messungen. Alle Signalverläufe werden mit Serien-Fahrzeugsensorik gemessen. Die beiden linken Graphen stellen eine Referenzmessung dar, in der die aktive Dämpfung deaktiviert ist. Rechts sind Signalverläufe für das gleiche Manöver mit aktivierter Differenzdrehzahlaufschaltung zu sehen. Die oberen Bilder zeigen jeweils die mittlere Drehzahl der nicht angetriebenen Vorderachse als Referenz $omega_{Rad,v}$ sowie die der angetriebenen Hinterachse $omega_{Rad,h}$. Zusätzlich werden die Motordrehzahl n_{Mot} sowie die Differenzdrehzahl $omega_{Diff}$ zwischen mittlerer Raddrehzahl der Hinterachse und auf die Hinterachse skalierter Kurbelwellendrehzahl ($\omega_{Mot,skaliert} = n_{Mot} * \pi/30 / i_{ges}$) dargestellt.

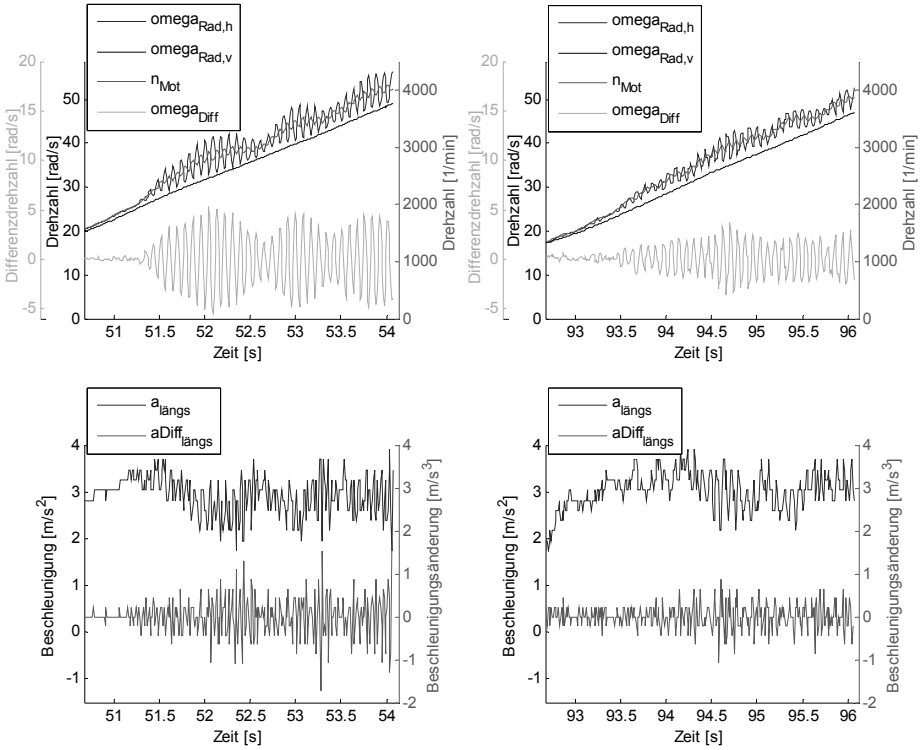


Bild 6: Experimentelle Ergebnisse. Links: Ohne Schwingungsdämpfung.
Rechts: Mit Differenzdrehzahlaufschaltung

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Zunächst lässt sich beim Vergleich der beiden oberen Graphen erkennen, dass bei aktivierter Dämpfung die Schwingamplitude der angetriebenen Räder abnimmt. Dies wird ebenfalls durch einen Vergleich der aufgetragenen Differenzdrehzahlen $omega_{Diff}$ deutlich. Um die komfortsteigernde Wirkung der aktiven Dämpfung beurteilen zu können, ist ein zusätzlicher Blick auf die Fahrzeuglängsbeschleunigung $a_{längs}$ nötig. Diese lässt zwar bei aktiver Dämpfung eine geringere Schwingamplitude vermuten, durch die unterschiedlichen Signalverläufe ist ein direkter Vergleich jedoch nicht möglich. Im Gegensatz zur Drehzahl liegt hier keine Referenz vor. Aus diesem Grund wird der Vergleich zwischen den Ableitungen $aDiff_{längs}$ der jeweiligen Beschleunigungen gewählt. Dadurch lässt sich das Schwingungsverhalten mittelwertfrei beurteilen. Der Vergleich der Beschleunigungsänderung zeigt, wie bereits durch die Reduktion der Differenzdrehzahl suggeriert, eine Verringerung des Schwingungsverhaltens.
Für eine weitreichendere Bestätigung des schwingungsreduzierenden Effektes werden die Ergebnisse mehrerer Messungen ausgewertet. Es werden insgesamt zwölf Messungen (sechs ohne Schwingungsdämpfung und sechs mit aktiver Differenzdrehzahlaufschaltung) eines Schlupfregelvorgangs ausgewertet und anschließend gemittelt. Die Resultate sind Tabelle 1 zu entnehmen. In der rechten Spalte ist die Änderung im Vergleich zur Referenz ohne Schwingungsdämpfung aufgetragen. Durch die aktive Dämpfung konnte die mittlere Amplitude der Differenzdrehzahl um 46,0 % verringert werden.

Tabelle 1: Auswertung des Einflusses der aktiven Dämpfung

	Ohne Dämpfung	Mit Differenzdrehzahlaufschaltung	Delta
Mittlere Amplitude der Differenzdrehzahl	3,67 $\frac{rad}{s}$	1,98 $\frac{rad}{s}$	- 46,0 %
Mittlere Amplitude der Beschleunigungsänderung	0,63 $\frac{m}{s^3}$	0,35 $\frac{m}{s^3}$	- 44,8 %
Mittlere absolute Beschleunigung	2,82 $\frac{m}{s^2}$	2,96 $\frac{m}{s^2}$	+ 5,1 %

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Auswertung des Einflusses der aktiven Dämpfung auf die Schwingungen der Fahrzeuglängsbeschleunigung wurde wie folgt durchgeführt. Für ein mittelwertfreies Signal, analog zur Differenzdrehzahl, wird zunächst die Ableitung der Beschleunigung bestimmt. Die Schwingintensität lässt sich nun über die mittlere Amplitude der Beschleunigungsänderung bestimmen.

Die Ergebnisse der Auswertung der Beschleunigungsschwingung sind in der zweiten Spalte von Tabelle 1 aufgetragen. Durch die Differenzdrehzahlaufschaltung konnte die mittlere Amplitude der Beschleunigungsänderung um 44,8 % reduziert werden. Das lässt direkt auf eine Reduktion der Schwingamplitude der Fahrzeuglängsbeschleunigung schließen und weiter auf eine Steigerung des Fahrkomforts.

Zuletzt wird die absolute Beschleunigung während der Schlupfregelung ausgewertet. Durch die aktive Schwingungsdämpfung kann die mittlere absolute Beschleunigung von 2,82 $\frac{m}{s^2}$ auf 2,96 $\frac{m}{s^2}$ erhöht werden. Dies entspricht einer Steigerung um ca. 5,1 %. Betrachtet wird hierbei ein Zeitintervall von jeweils 2,5 Sekunden ab der erstmaligen Überschreitung des Radschlupfs von 8%, was dem Beginn der Drehzahlregelung entspricht. Die Länge des Zeitintervalls wurde so bestimmt, dass die Dauer der Schlupfregelung aller Messungen mindestens dem gewählten Zeitintervall entspricht. Weiter kann in diesem Zeitintervall ein anfänglicher Überschwinger aus- und die Regelgröße stationär eingeregelt werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Während eines Schlupfregelvorgangs treten hohe Torsionsschwingungen im ATS auf, welche einen negativen Einfluss auf den Fahrkomfort haben und das Beschleunigungsvermögen einschränken. Aus diesem Grund wird ein Regler vorgestellt, der ausschließlich auf der Rückführung gemessener Fahrzeugsignale beruht. Der Ansatz wird zunächst anhand eines Modells theoretisch untersucht wobei ein dämpfender Effekt nachgewiesen wird. Im Anschluss folgen experimentelle Untersuchungen. Die Auswertung zeigt ebenfalls eine Reduktion der auftretenden Torsionsschwingungen. Im Fahrversuch kann die Schwingamplitude der Differenzdrehzahl zwischen angetriebener Achse und skalierter Motordrehzahl um 46,0 % reduziert werden. Weiter wird eine Minderung der auftretenden Längsbeschleunigungsschwingungen beobachtet. Diese ist unmittelbar vom Fahrer wahrnehmbar, sodass eine Komfortsteigerung der Dämpfungsfunktion impliziert wird. Hier zeigt sich eine Reduktion der Schwingamplitude um 44,8 %. Darüber hinaus kann die mittlere absolute Beschleunigung des Fahrzeugs durch den vorgestellten Dämpfungsregler um 5,1 % erhöht werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Weitere aktuell laufende Untersuchungen zielen auf Robustheit des Konzeptes gegenüber Reifen, Beladung und Antriebstopologie ab. Zusätzlich wird das Entwurfsmodell weiterentwickelt, um eine bessere Übereinstimmung von Realität und Modell zu erzielen. Darüber hinaus wird die Dämpfungswirkung im Zusammenhang mit der übergeordneten Drehzahlregelung im Verbund betrachtet. Ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt besteht zudem aus der Regelung und Ansteuerung der Antriebsaggregate eines P2-Hybrids für die Drehzahlregelung und Schwingungsdämpfung im grenzstabilen Schlupfbereich.

Literatur:

[1] Yeap K. Z.; Müller S.: Characterising the interaction of individual-wheel drives with traction by linear parameter-varying model: a method for analyzing the role of traction in torsional vibrations in wheel drives and active damping. In: Vehicle System Dynamic, Volume 54, 2016 – Issue 2

[2] Reif K.: Bosch Grundlagenfahrzeug- und Motorentechnik. Vieweg + Teubner. 2011

[3] Schröder D.: Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen. Springer Verlag. 4. Auflage, 2015

[4] Zemke S.: Analyse und modellbasierte Regelung von Ruckelschwingungen im Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen. Dissertation. 2012

[5] Götting G.: Dynamische Antriebsregelung von Elektrostraßenfahrzeugen unter Berücksichtigung eines schwingungsfähigen Antriebsstrangs. Dissertation. 2004

[6] Schwenger A.: Aktive Dämpfung von Triebstrangschwingungen. Dissertation. 2005

[7] Rosenberger M.; Kirschneck M.; Koch T.; Lienkamp M.: Hybrid-ABS: Integration der elektrischen Antriebsmotoren in die ABS-Regelung. In: 2. Automobiltechnisches Kolloquium München. 2011

[8] Rosenberger M.; Schindele F.; Koch T.; Lienkamp M.: Analyse und aktive Dämpfung von Antriebsstrangschwingungen bei Elektrofahrzeugen während der ABS-Regelung. 8. Tag des Fahrwerks. 2012

[9] Lunze J.: Regelungstechnik 1. Springer Verlag. 8. Auflage 2010

[10] Zegelaar P. W. A.: The Dynamic Response of Tyres to Brake Torque Variations and Road Unevennesses. Dissertation. 1998

[11] Harris C. M.; Piersol A. G.: Harris' shock and vibration handbook. McGraw-Hill, New York, 2002

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

A path planning controller for unsignalized intersection based on model predictive control and potential field method

M.Eng. **Qiannan Wang**, Prof. Dr.-Ing. **Steffen Müller**,
Fa. Kraftfahrzeuge, Technische Universität Berlin

Abstract

In this study, a path planning controller for unsignalized intersection is designed. The controller is divided into two levels: path definition level and path replanning level. In the path definition level, a path connecting the start and the end point is given. In the path replanning level, model predictive control and potential field method are combined to generate obstacle-free trajectories. Modified collision coefficient is presented to better estimate risks of obstacles. Finally, the effectiveness of the controller is validated by computer simulations.

1. Introduction

With the ability of improving road safety and comfort, autonomous driving is a very popular topic among manufacturers and researchers. Normally, in order to achieve autonomy, three steps are necessary: environment perception, path planning and actuator control. Path planning plays a critical role, which can generate a feasible and collision-free path for vehicles.

Nowadays, researches for path planning are mostly carried out in urban areas such as highways and city roads. However, automated vehicles may also drive on rural roads, which have different characteristics compared with urban roads. Automated driving on rural roads can often involve unsignalized intersections. Intersections without traffic signals have higher risks of conflicts and crashes than conventional signalized intersections [1-3]. Statistical studies show that about 30% of roadway fatalities in U.S. are related to intersections. Furthermore, 60% of them are related to unsignalized intersections [4]. Therefore, designing path planning controller for unsignalizd intersections is of great importance to improve road safety.

The rest of paper is organized as follows. At first, the control structure of the system is presented in section 2. The controller is divided into two levels: path definition and path replanning. The detailed formulation of the path planning controller is designed in section 3 and section 4. Section 5 discusses the simulation results, and conclusions are described in section 6.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Control Structure

Figure 1 shows the block diagram of the controller. It consists of two levels: path definition and path replanning. In the path definition level, a path that connects the start point and the end point is generated. The outputs of this level are the reference vehicle positions X_{ref} and Y_{ref} in global coordinates. In the path replanning level, a model predictive controller is adapted to generate collision-free trajectories. The outputs of this level are the desired steering angle and acceleration. Detailed information about the controller is presented in the following section.

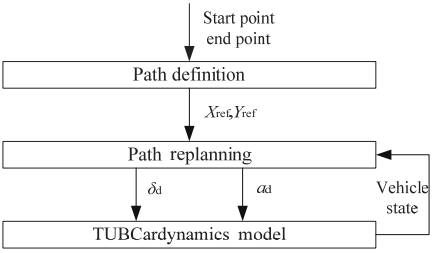


Fig. 1: Control structure of the controller

3. Path Definition Level

In this level, a reference path for the vehicle to follow is generated. As the work focuses on unsignalized intersections, two scenarios are considered. One scenario is that the subject vehicle goes straightforward through the intersection, while another vehicle goes across the intersection through right side, as shown in Figure 2(a); and another scenario is that the vehicle goes straightforward through the intersection, while another vehicle turns right at the intersection, as shown in Figure 2(b). The reference path for the subject vehicle is a straight line.

4. Path Replanning Level

In this section, obstacles are taken into consideration. A path replanning controller for collision-free trajectories based on model predictive control is designed.

4.1 Modeling

Due to the simplicity and less computational load, a point mass model is used here. In order to avoid obstacles, a potential like function is first introduced as follows:

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$d_o = \frac{K}{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 + \varepsilon} \quad (1)$$

where x and y, x_o and y_o are the coordinates of the vehicle and the obstacle, respectively; K is a constant potential gain, which helps tune the shape of the function; and ε is a slack variable for avoiding singularity.

From Figure 3 we can see that the value of the potential function d_o increases as the distance to the obstacle decreases and the value approaches zero as the distance to the obstacle becomes infinity. Therefore, the potential function can be used as an additional state for the system. Considering the shape of the vehicle and the obstacles in reality, the distance between the vehicle and the obstacle should be further than 2m. A hard constraint is given to d_o, which $d_o \leq 0.4$. Here K=2 and ε=1.

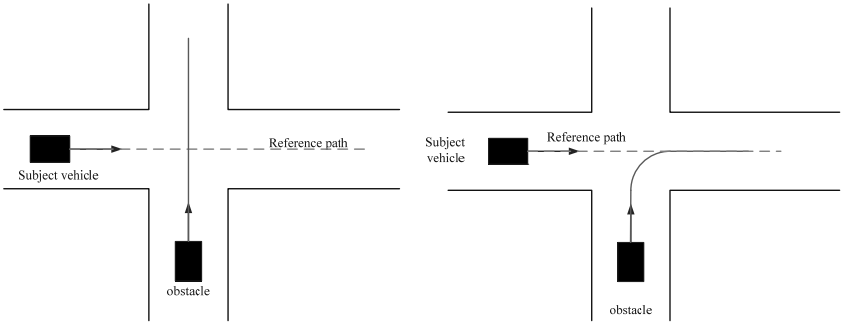


Fig. 2: Reference paths at intersections

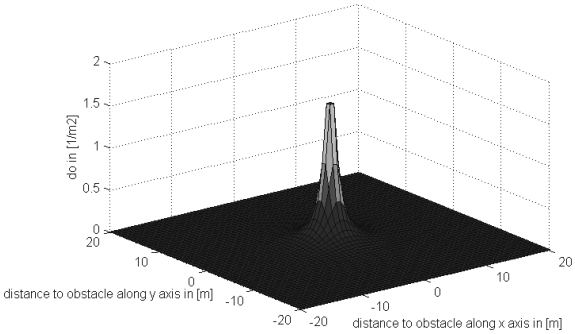


Fig. 3: Potential function

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In this paper, one obstacle is considered. The detailed system equations can be found in paper [5]. The point mass model consists of 9 state variables and 2 control inputs.

$$x_k = \begin{bmatrix} x & y & v & \varphi & a_x & a_y & y_e & \varphi_e & d_o \end{bmatrix}^T$$

$$u_k = \begin{bmatrix} a_{xd} & a_{yd} \end{bmatrix}^T$$

Where x, y and ϕ are the vehicle positions and yaw angle in global coordinates; v is the velocity of the vehicle; a_x and a_y are the longitudinal and lateral accelerations; a_{xd} and a_{yd} are the desired control inputs; y_e and ϕ_e are lateral error and heading error.

4.2 Collision cone

In section 4.1, a potential function related to the obstacle's distance is described. However, in order to evaluate the threat of an obstacle, not only the distance is important, but also the relative moving direction between the vehicle and the obstacle cannot be neglected.

In [6] a collision cone is defined. ξ is the visibility angle, which is the angle of upper and lower tangent lines between the vehicle and the obstacle and defines the collision cone width; v is the relative velocity between the vehicle and the obstacle; Ψ is the angle between the relative velocity and x axis; θ is the angle between the center line connecting the obstacle and the vehicle and the x axis.

From the figure 4 we can see that the obstacle and the vehicle will collide when

$$\psi \in \left[\theta - \frac{\xi}{2}, \theta + \frac{\xi}{2} \right]$$

A collision coefficient B which indicates the threat of the obstacle is defined according to the following equation (2). B=1 means that the obstacle is dangerous; B=0 means that the obstacle is safe for the vehicle.

$$\begin{cases} if \quad \theta - \xi/2 \le \psi \le \theta + \xi/2 \\ \qquad B = 1 \\ \qquad else \\ \qquad B = 0 \end{cases} \tag{2}$$

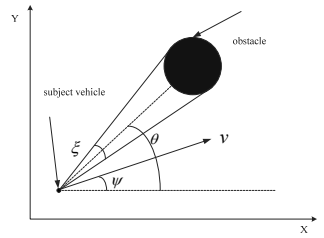


Fig. 4: Collision cone

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In order to simplify the problem, usually the vehicle is assumed to be a point, and the obstacle is enlarged as a circle with the radius of both the vehicle and the obstacle. However, in real life, we should consider the shape of the vehicle. Here, four more boundary points on the vehicle as shown in Figure 5 are considered and we get a modified collision coefficient $\hat{B}$.

$$\hat{B} = \max(B_1, B_2, B_3, B_4, B_5)$$

B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 can be calculated based on the above equations (2). The modified collision coefficient $\hat{B}$ will be used as an additional weighting factor for the controller in the next design section.

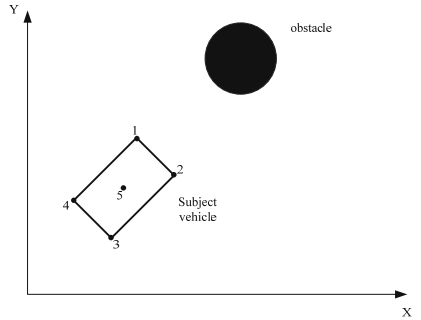


Fig. 5: Modified collision cone

4.3 Controller design

The discretized state variables and control inputs of the system are

$$x_k = \begin{bmatrix} x & y & v & \varphi & a_x & a_y & y_e & \varphi_e & d_o \end{bmatrix}^T$$

$$u_k = \begin{bmatrix} a_{xd} & a_{yd} \end{bmatrix}^T$$

In order to solve the optimal problem, the following cost function is minimized to get optimal control inputs:

$$J = \sum_{k=1}^{H_p} Q_1 (x - x_{ref})^2 + \ldots + Q_9 \hat{B} (d_o - d_{oref})^2 + \sum_{k=1}^{H_c} R_1 (a_{xd} - a_{xdref})^2 + R_2 \left(a_{yd} - a_{ydref}\right)^2 \quad (3)$$

Subject to

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k, u_k) \\ \sqrt{{a_{xd}}^2 + {a_{yd}}^2} \le \mu g \\ d_o \le 0.2 \end{cases} \quad (4)$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Where k is the time step, H_p is the length of the prediction horizon and H_c is the length of control horizon; Q and R are diagonal weighting matrices as described by equation (5); μ is the tire road friction coefficient; g is the gravity acceleration. The modified collision coefficient $\hat{B}$ is added to the weighting factor Q_9. If $\hat{B}$ equals zero, the corresponding terms in the cost function becomes zero. As a result, the controller takes no action towards the corresponding obstacle.

$$Q = \begin{bmatrix} Q1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & Q2 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & ... & Q_9 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

5. Simulation

In order to validate the effectiveness of the proposed controller, numerical simulations have been carried out using TUBCarDynamics.

The MPC controller has been implemented as an S-function in Matlab/Simulink through the code generation functionality provided by ACADO Toolkit [7]. The two simulation scenarios are shown as Figure 2. Other vehicles' information such as positions, velocities and orientations are assumed to be already known.

5.1 Go straight

In this scenario, one vehicle goes straightforward through an unsignalized intersection and another vehicle goes across the intersection from the right side, as shown in Figure 2(a). At the beginning, the subject vehicle is located at (0, 0) and the other is located at (100,-100). Both the two vehicles are moving at velocity of 5m/s. From the generated trajectory as shown in Figure 6(a) we can see that, the subject vehicle takes action to avoid colliding with the other vehicle. Figure 6(b) shows the distance between the two vehicles. And Figure 6(c) is the enlarged part around the minimum distance in Figure 6(b). From Figure 6(c) we can see that the minimum distance between the two vehicles is longer than 2m, which means that there is no collision between the two vehicles during the whole simulation. Figure 6(d) shows the generated accelerations and Figure 6(e) shows the yaw rate of the subject vehicle.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

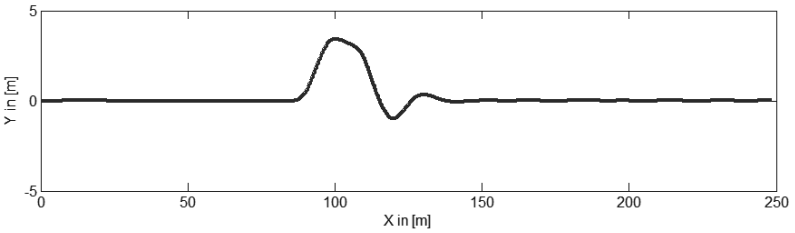


Fig. 6 (a): Trajectory

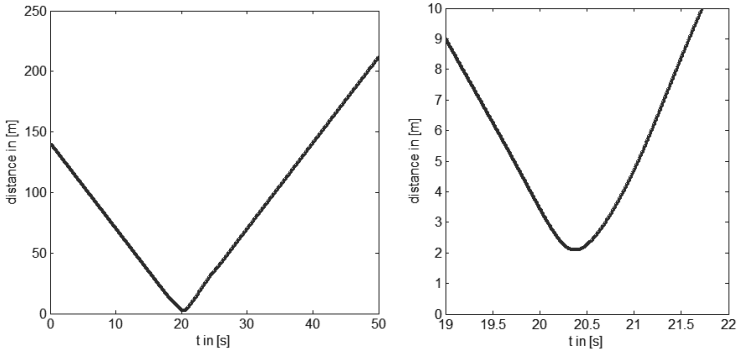


Fig. 6 (b): Distance between two vehicles

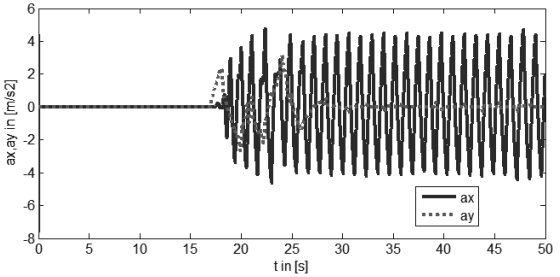


Fig. 6 (d): Acceleration

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

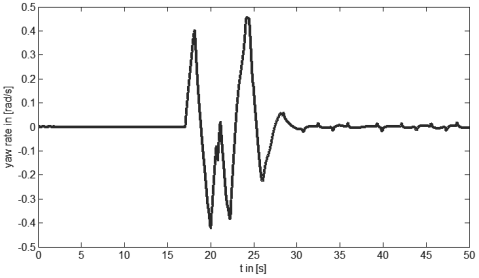


Fig. 6 (e): yaw rate

5.2 Turn right

In this scenario, the subject vehicle goes straightforward through an unsignalized intersection and another vehicle turns right, as shown in Figure 2(b). At the beginning, the subject vehicle is located at (0, 0) and the other is located at (30,-30). The two vehicles are moving at 5m/s and 3m/s, respectively. From the generated trajectory as shown in Figure 7(a) we can see that, the subject vehicle takes action to avoid collision with the other vehicle. Figure 7(b) shows the distance between the two vehicles during the whole simulation. The minimum distance between the two vehicles is longer than 10m, which means that there is no collision between the two vehicles during the whole simulation. Figure 7(c) shows the generated accelerations and Figure 7(d) shows the yaw rate of the subject vehicle.

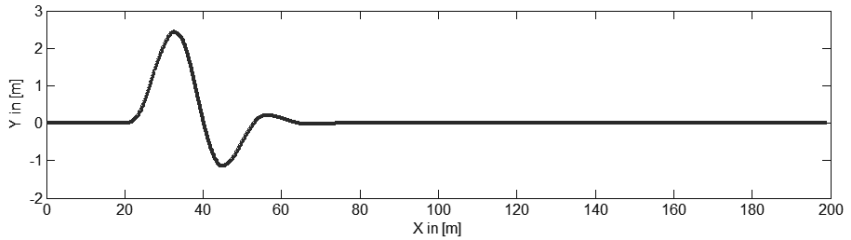


Fig. 7 (a): Trajectory

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

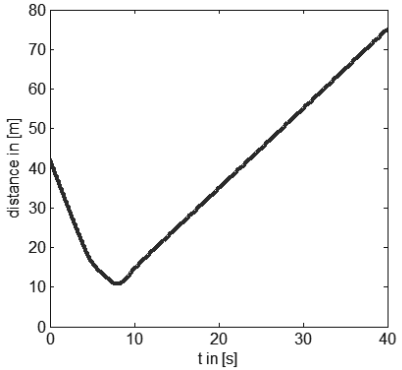


Fig. 7 (b): Distance

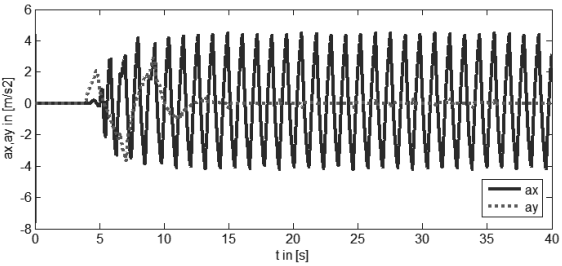


Fig. 7 (c): Acceleration

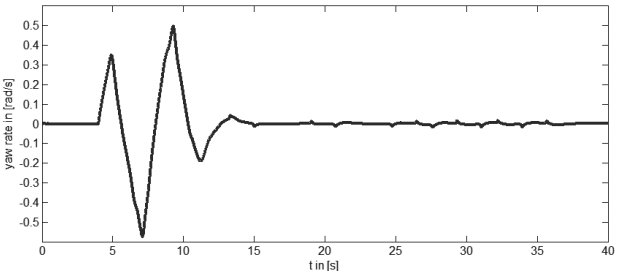


Fig. 7 (d): Yaw rate

6. Conclusion and outlook

In this paper, a path planning controller for unsignalized intersections is designed. A method based on model predictive control and potential field method is proposed. A modified collision coefficient is presented to better avoid obstacle. Simulation results show that the con-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

troller is useful avoiding obstacles when dealing with unsignalized intersections, which can help improve the safety. In the future, the controller will be extended to other scenarios such as parking lots. Moreover, practical experiments with a scaled vehicle will be carried out.

7. Reference

[1] Dong-Kyoung. et al. “Decision making for automated driving at unsignalized intersection’’, 15th International Conference on Control, Automation and Systems, 2015.

[2] Zhizhou Wu. et al. “ Study on the collision avoidance strategy at unsignalized intersection based on prescan simulation’’, 13th COTA International Conference of Transportation Professionals, 2013.

[3] Jiang Liu. et al. “A lane level positioning-based cooperative vehicle conflict resolution algorithm for unsignalized intersection collisions’’, Computer and Electrical Engineering 39, 2013, pp. 1381-1398.

[4] Seong-Woo Kim. et al, “Decision making for automated driving at unsignalized intersection’’.15th International Conference on Control, Automation and Systems, 2015.

[5] Qiannan Wang, Steffen Müller. “A hierarchical controller for path planning and path following”. 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2016.

[6] Belkhouche F, Bendjilali B. “Reactive path planning for 3-D autonomous vehicles”. IEEE transactions on control systems technology (vol.20, No.1): 249-256.

[7] Ariens David et al. 2014. ACADO Toolkit User’s Manual. http://www.acadotoolkit.org.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Assistenzsystem für automatisierte Fahrzeugpositionierung bei induktiven Ladesystemen

Assistance system for automated vehicle positioning at inductive charging systems

Matthias Hisung M.Eng., Dipl.-Ing. **Dean Martinovic**, Dr.-Ing. **Michael Grimm**, Prof. Dr.-Ing. **Hans-Christian Reuss**, Universität Stuttgart, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK), Stuttgart

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein Konzept für ein Assistenzsystem zum automatisierten Positionieren von Elektrofahrzeugen auf Ladespulen vorgestellt. Es basiert auf einem am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) entwickelten und patentierten Positionierungssystem (MPPS – Magnetic Pulse Positioning System), das erstmals ein magnetisches Pulssignal zur Ortung der Ladespule nutzt. Es erreicht eine Präzision im Millimeterbereich bei einem Radius von bis zu 3,5 m zum Spulenmittelpunkt. Hierdurch kann der Fahrer das Fahrzeug manuell präzise über die Ladespule abstellen und es induktiv Laden. Eine Probandenstudie mit 60 Probanden, die in Kooperation mit dem Institut für Wirtschaftsinformatik und Dienstleistungen (WID) der TU Ilmenau am IVK durchgeführt wurde, zeigte, dass durch das Positionierungssystem die Akzeptanz von induktiven Ladesystemen jetzt deutlich höher als beim Kabelladen ist.

Um den Komfort und damit die Akzeptanz noch weiter zu erhöhen, wird hier ein Konzept für ein Assistenzsystem vorgestellt. Das Konzept sieht vor, dass durch zusätzlich montierte Laserscanner der Raum vor und hinter dem Fahrzeug überwacht wird, um mittels einer Sensorfusion Kollisionen mit anderen Objekten und Personenschäden zu vermeiden. Darüber hinaus wird eine grid-basierte 2D-Karte der aktuellen Parksituation erstellt. Diese dient dem Planungsalgorithmus als Ausgangsbasis. Im Mittelpunkt des Konzepts steht der Planungsalgorithmus, durch den die Präzision im Millimeterbereich für die Positionierung des Fahrzeugs erreicht wird. Es werden für die Berechnung der Trajektorie unterschiedliche Planungsstrategien in Abhängigkeit der Entfernung, der Umgebung und der Ausrichtung des Fahrzeugs zur Ladespule herangezogen. Dabei gilt es zu jeder Zeit eine Kollisionsprüfung durchzuführen und bei der Ausführung zu überwachen. Ein weiterer Anforderungspunkt an die Planungsstrategien ist die Echtzeitfähigkeit.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Da keine Sichtverbindung zwischen Sensoren und Signalquelle benötigt wird, ist das Assistenzsystem anders als kamerabasierte Systeme unabhängig von witterungsbedingten Sichtverhältnissen wie Schnee oder Regen. Aus diesem Grund ist der Ansatz sowohl für den Einsatz in der heimischen Garage, als auch im Außenbereich geeignet und in jedes Fahrzeug integrierbar. Zudem erhöht es den Komfort und die Akzeptanz von induktiven Ladesystemen.

Abstract

This paper presents a concept for an assistance system with the aim to autonomously positioning electric vehicles on charge coil. It is based on a patented positioning system (MPPS - Magnetic Pulse Positioning System) from the Institute of Internal Combustion Engines and Automotive Engineering (IVK), which uses a magnetic pulse signal to locate the charge coil. It achieves a precision in millimeter range with a radius of up to 3.5 m to the coil center. This allows the driver to manually place the vehicle precisely over the charge coil and charge it inductively. The IVK in cooperation with the Institute for Business Informatics and Services (WID) of the TU Ilmenau showed in a study with 60 volunteers that the acceptance of inductive charging systems is now significantly higher than the cable charging system.

In order to further increase the comfort and the acceptance of inductive charging system, a concept for an assistance system is presented here that performs and automates the exact positioning of the vehicle for inductive charging. The concept provides that the space in front of and behind the vehicle is monitored by additionally mounted laser scanners in order to avoid collision with other objects and personal injury. In addition, a grid-based 2D map of the current park situation is created. This serves as a starting point for the planning algorithm. At the center of the concept is the planning algorithm, which achieves the precision in millimeter range for the positioning of the vehicle. For the calculation of the trajectory, different planning strategies are used depending on the distance, the environment and the orientation of the vehicle to the loading coil. At all times a collision check must be carried out and monitored during execution. A further requirement point for the planning strategies is the real-time capability. Because no visual connection between sensors and signal source is necessary, the assistance system is different from camera-based systems and is independently of weather-related conditions such as snow or rain. Therefore, the approach is suitable for use in the domestic garage as well as outdoor and can be integrated into any vehicle. It also increases the comfort and acceptance of inductive charging systems.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1. Einleitung

Die Ladung von Elektrofahrzeugen erfolgt zunehmend nicht mehr per Kabel, sondern mittels induktiver Ladesysteme. Einer der Gründe ist, dass das Induktivladen deutlich komfortabler für den Fahrer verglichen mit dem Kabelladen ist; insbesondere bei schlechtem Wetter. Dies zeigte eine Probandenstudie mit 60 Probanden, die in Kooperation mit dem Institut für Wirtschaftsinformatik und Dienstleistungen (WID) der TU Ilmenau am IVK durchgeführt wurde [1]. Um jedoch einen hohen Wirkungsgrad von über 90 % und eine optimale Ladezeit zu ermöglichen, müssen die Zentren der Boden- und Fahrzeugspule auf wenige Zentimeter genau übereinander platziert werden. Da die Spulen im Vergleich zu den Fahrzeugabmessungen relativ klein sind und der Fahrer keine Sichtverbindung zu den Spulen hat, ist dies für den Fahrer eine sehr schwierige Aufgabe. Daher wurde am IVK im Projekt „BIPoLplus“, das im Rahmen des Spitzenclusters „Elektromobilität Süd-West“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde, das patentierte Assistenzsystem MPPS [2] konzipiert und entwickelt, das den Fahrer bei der Ausrichtung des Fahrzeugs unterstützt (siehe Bild 1).



Bild 1: MPPS im Betrieb

Um den Komfort und die Akzeptanz des Induktivladens weiter zu erhöhen, wird in diesem Beitrag ein Konzept für ein Assistenzsystem vorgestellt, das den Parkvorgang automatisiert und die Feinpositionierung des Fahrzeugs über der Ladespule vornimmt. Dadurch muss sich der Fahrer nicht weiter um den Parkvorgang kümmern, sondern kann sein Auto wie gewohnt parken und verlassen. Alles Weitere wird vom Assistenzsystem übernommen.

Die Vorteile des Assistenzsystems bestehen darin, dass keine Sichtverbindung wie bei kamerabasierten Systemen [3] zwischen dem Fahrzeug, der Ladespule und Umgebung bestehen muss. Somit funktioniert das System auch bei schlechtem Wetter wie Regen und Schnee sowie bei Dunkelheit. Darüber hinaus muss sich der Fahrer nicht umgewöhnen oder etwas Zusätzliches beim Parken beachten, was die Akzeptanz weiter erhöhen wird und das Assistenzsystem für die heimische Garage und den Außenbereich interessant macht.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Systemübersicht

2.1 MPPS – Magnetic Pulse Positioning System

Die folgende Abbildung spiegelt die prinzipielle Funktionsweise des MPPS wieder.

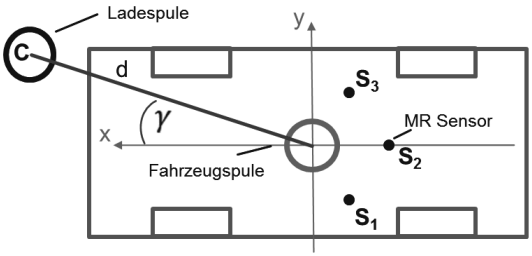


Bild 2: Prinzip des MPPS

Die Ladespule im Parkplatzboden erzeugt eine magnetische Flussdichteverteilung $\boldsymbol{B}$, deren vertikale Komponente B_z von mehreren magneto-resistiven (MR) Sensoren $\boldsymbol{S_i}$ abgetastet wird. Die MR Sensoren sind hierzu am metallischen Unterboden des Fahrzeugs angebracht. Da B_z rotationssymmetrisch ist und ab einer Mindestentfernung d_{min} vom Zentrum der Ladespule einen streng monotonen Verlauf wie in Bild 3 aufweist, kann jedem Abtastwert eines MR Sensors $\boldsymbol{S_i}$ eindeutig die Distanz d_i zugeordnet werden.

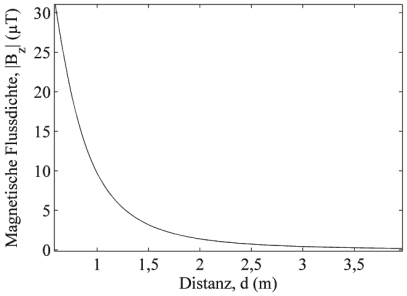


Bild 3: Betrag von $\boldsymbol{B_z}$ streng monoton fallend

Wird das Fahrzeug als Bezugssystem gewählt, können die folgenden Kreisgleichungen bezogen auf das Koordinatensystem in Bild 2 aufgestellt werden [4]:

$$\begin{aligned}(C_x - S_{1x})^2 + \left(C_y - S_{1y}\right)^2 &= d_1^2 \\ &\vdots \\ (C_x - S_{ix})^2 + \left(C_y - S_{iy}\right)^2 &= d_i^2 \end{aligned} \tag{1}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Durch Lösen des nichtlinearen Gleichungssystems (1) können die Koordinaten C_x und C_y der Ladespule anschließend eindeutig berechnet werden. Das Verfahren wird als Trilateration bezeichnet.

Das von der Ladespule erzeugte Positionierungssignal, das von den MR Sensoren abgetastet wird, ist bei dem aktuellen Prototyp kein statisches Signal, sondern ein niederfrequentes magnetisches Pulssignal von 10Hz wie prinzipiell in Bild 4 dargestellt.

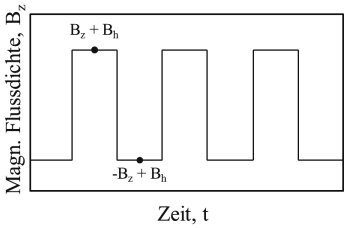


Bild 4: Magnetisches Pulssignal

Durch Verknüpfung der stationären Abtastwerte zweier benachbarter Pulshalbwellen über die Differenz in (2) können niederfrequente und statische Störgrößen B_h - wie z.B. das Erdmagnetfeld - eliminiert werden [4], was bei einem statischen Signal nicht möglich wäre.

$$B_{diff} = \frac{1}{2}|(B_z + B_h) - (-B_z + B_h)| \tag{2}$$

Dem differentiellen Messwert B_{diff} kann anschließend über den Vergleich mit dem Betrag der bekannten magnetische Flussdichteverteilung aus Bild 3 eindeutig eine Distanz zugeordnet werden. Nachdem die Distanzen d_i für alle i MR Sensoren auf die gleiche Weise ermittelt wurden, kann die Trilateration (1) gelöst werden. Die Synchronisation der Abtastzeitpunkte mit den stationären Bereichen des Pulssignals erfolgt automatisch über einen speziellen Algorithmus [4]. Dadurch ist keine Kommunikation während des Positionierungsvorgangs nötig, was das Verfahren sehr zuverlässig und robust macht.

Zudem verursacht das quasi-stationäre Pulssignal im Gegensatz zu sinusförmigen Signalen im leitfähigen Unterboden des Elektrofahrzeugs keine elektrischen Wirbelströme, die wiederum magnetische Störfelder erzeugen und die Positionierungsgenauigkeit beeinträchtigen.

Die Besonderheit am MPPS neben der effizienten Signalverarbeitung ist die im Rahmen einer Promotion am IVK konzipierte und nachgewiesene Methode zur Lösung von Feldverzerrungen durch magnetische Materialien wie dem Fahrzeug selbst. Erst diese Methode verleiht dem MPPS die bisher unerreichte hohe Präzision im Millimeterbereich und ermöglicht die

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

genaue Positionierung sogar auf Stahlbetonböden. Die ultrahochempfindlichen MR Sensoren sichern einen großen Positionierungsradius. Das System funktioniert zuverlässig bei allen Wetterlagen und Lichtverhältnissen. Die flüssige Positionsanzeige sorgt für ein hohes Komfortgefühl beim Benutzer. Das MPPS sichert eine hohe Benutzerakzeptanz von induktiven Ladesystemen und Elektrofahrzeugen und könnte damit eine Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität werden.

2.2 Versuchsträger

Als Versuchsträger für das Assistenzsystem steht ein Smart ForTwo (siehe Bild 5) zur Verfügung.



Bild 5: Versuchsträger mit umfangreicher Mess- und Regelungstechnik im Kofferraum

Der vorhanden Smart ForTwo wurde auf ein batterieelektrischen Antrieb umgerüstet und mit umfangreicher Mess- und Regelungstechnik instrumentiert (Details siehe [5]). Dabei wurden weitere Komponenten wie Lenkradaktor, Bremsaktor und Ladeelektronik mit induktiver Ladespule integriert. Für die Vorausschau und die Umfelderkennung stehen dem Fahrzeug zusätzlich zum 77 GHz Long Range Radar Sensor (ARS 308-2) [6], zwei Laserscanner (LMS511-10100 PRO) der Firma Sick AG zur Verfügung. Der LMS511 PRO Laserscanner besitzt eine Scanfrequenz von 100 Hz bei einer horizontalen Winkelauflösung von 0,166°. Der Öffnungswinkel beträgt 190° und es können Objekte in einem Messbereich von bis zu 80 m erfasst werden [7]. Darüber hinaus sind Beschleunigungssensoren und ein GPS-System an Bord. Die Fahraufgabe und Steuergeräte des Fahrzeugs werden über ein Rapid Prototyping System geregelt und simuliert.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3. Konzept

Im Mittelpunkt des Konzepts steht die Planungsstrategie, die in den definierten Szenarien zu jeder Zeit eine fahrbare Trajektorie bereitstellen muss. Durch die erstellte Trajektorie wird eine Präzision im Millimeterbereich für die Positionierung des Fahrzeugs erreicht. Dabei muss beachtet werden, dass einerseits die Trajektorie von dem Fahrzeug abfahrbar ist und andererseits eine Kollision mit Objekten, wie Fußgänger, Schildern oder anderen Fahrzeugen vermieden wird (siehe Bild 6). Das Konzept sieht daher zwei unterschiedliche Planungsstrategien vor. Diese werden in Abhängigkeit der Entfernung der Ladespule zum Fahrzeug gewählt, da aufgrund des hohen Signal-Rausch-Verhältnis in der Nähe der Ladespule der Algorithmus angepasst werden kann. Weiteres Auswahlkriterium der Planungsstrategie ist die Umgebung und Ausrichtung des Fahrzeugs. Wenn das Fahrzeug von seiner Ausrichtung und Entfernung zur Ladespule günstig steht, soll ein schneller Algorithmus verwendet werden. Der Algorithmus berechnet den euklidischen Abstand zwischen Fahrzeug und Ladespule und nimmt diesen als Trajektorie an. Die Grenzen des schnellen Algorithmus sind dadurch gekennzeichnet, dass das Fahrzeug im Radius des MPPS stehen muss mit einer zur Spule orientierter Ausrichtung.

Als Ausgangsbasis für den Algorithmus dienen die Positionsdaten des MPPS, eine Karte des Umfelds, die Fahrzeugeigenschaften, sowie die Fahrzeugorientierung zum Parkplatz mit der vorhandenen Ladespule. Die Karte des aktuellen Umfelds wird aus der Messdatenfusion der am Fahrzeug montierten Laserscanner erstellt. Durch eine Synchronisation der Laserscanner untereinander wird eine einheitliche Zeitbasis der Gesamtmessung erreicht. Aus dem 2D-Abbild der Fahrzeugumgebung wird eine grid-basierte Belegungskarte erstellt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

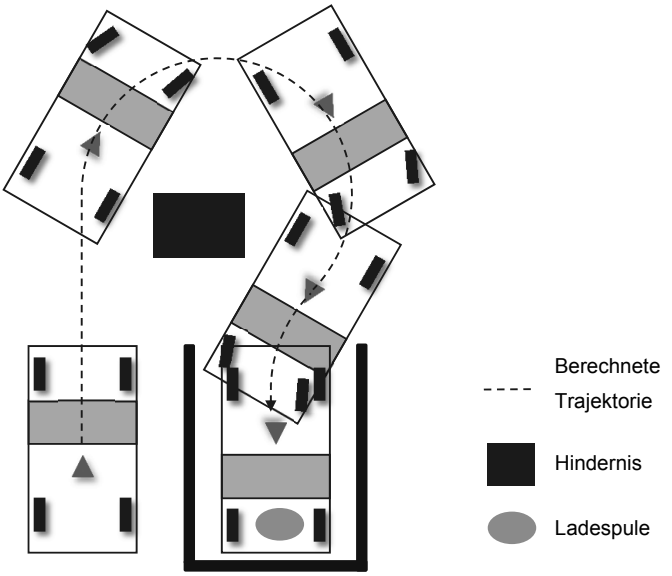


Bild 6:Berechnete Trajektorie des Planungsalgorithmus

Die grid-basierte Belegungskarte wurde einer objektbezogenen Karte vorgezogen, da es sich bei Parkvorgängen im urbanen Umfeld hauptsächlich um statische Hindernisse handelt. Damit der Algorithmus auf der grid-basierten Belegungskarte mathematische Berechnungen durchführen kann, wird die Karte in einen Graphen mit Knoten und Kanten überführt (siehe Bild 7). Dabei repräsentieren die einzelnen Knoten des Graphen jeweils eine Zelle der grid-basierten Belegungskarte und die Kanten die Verbindung der Knoten untereinander.

Der Startpunkt für die Planungsstrategien ergibt sich aus der aktuellen Position und Richtung des Fahrzeugs bezüglich der Ladespule. Über die Positionsdaten des MPPS ist der Ort der Ladespule bekannt. Anschließend erfolgt eine Entscheidung, welcher der beiden Planungsstrategien zur Anwendung kommt und die Trajektorie für das Fahrzeug berechnet. Zur Auswahl für die Entscheidung steht der schnelle Algorithmus, der die euklidische Distanz einbezieht oder der komplexere und leistungsfähigere A*-Algorithmus, der auch Hindernisse berücksichtigt und umfahren kann. Der A*-Algorithmus wurde dem Dijkstra- und Greedy-Algorithmus vorgezogen, da er im Vergleich immer eine optimale Route findet unter der Einschränkung, dass der Zielpunkt auch zu erreichen ist. Darüber hinaus ist der A*-Algorithmus optimal effizient und kommt durch den Einsatz einer gewichteten Heuristik mit weniger Rechenschritten aus [8][9].

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

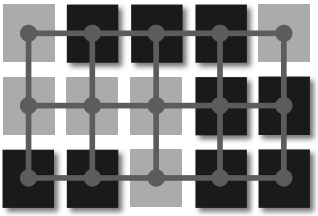


Bild 7: Überführung der grid-basierten Belegungskarte in einen digitalen Graphen

Die erzeugte Trajektorie der Planungsstrategie wird beim Abfahren parallel auf eine mögliche Kollision mit Hindernissen überprüft. So lässt sich bei weit im Voraus auftauchenden Hindernissen eine Ausweichroute planen um diese zu umfahren. Sollte ein Hindernis kurz vor dem Fahrzeug auftauchen, sodass es nicht möglich ist eine Ausweichroute zu fahren, wird das Fahrzeug auf der Stelle gestoppt um eine Kollision zu vermeiden.
Ein weiterer Anforderungspunkt an die Planungsstrategien ist die Echtzeitfähigkeit, um das Fahrzeug nicht unnötig anhalten zu müssen bis eine Trajektorie errechnet wurde. Zudem ist es sinnvoll, jederzeit eine Ausweichroute berechnen und zu jeder Zeit abfahren zu können. Aus diesem Grund sollen die Berechnungen der Algorithmen auf einer Graphics Processing Unit (GPU) erfolgen. Darüber hinaus gilt es das Konzept weiter zu optimieren und zu erweitern.

4. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Konzept für ein Assistenzsystem vorgestellt, das die automatisierte Positionierung des Fahrzeugs für induktive Ladesysteme vornimmt. Dabei wird über das MPPS und Laserscanner die Start- bzw. Zielposition des Fahrzeugs festgelegt und eine Umgebungskarte erstellt. Anschließend wird eine passende Planungsstrategie aus zwei Möglichkeiten gewählt und der hinterlegte Algorithmus zur Berechnung der Trajektorie ausgeführt. Während dem Abfahren der Trajektorie wird zu jeder Zeit eine Kollisionsprüfung des Fahrzeugs mit seiner Umgebung durchgeführt. Bei auftretenden Hindernissen wird eine entsprechende Ausweichstrategie erzeugt.
Das Konzept hat Vorteile gegenüber kamerabasierten Positionierungssystemen, da es unabhängig von einer Sichtverbindung ist. Somit lässt es sich sowohl nachts als auch bei schlechten Witterungsverhältnissen wie Schnee oder Regen einsetzen. Es ist in der heimischen Garage, wie im Außenbereich einsetzbar. Durch das vorgestellte Konzept lässt sich die Akzeptanz und der Komfort von induktiven Ladesysteme weiter erhöhen.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literatur:

[1] Müllerleile, T.; Martinovic, D.; Joenssen, D. W.; Orner, M.; Grimm, M.; Nissen, V.; Reuss, H.-C.: Fully Charged: Process Acceptance of Different EV Charging Processes / Social Science Research Network. Rochester, New York: SSRN Scholarly Paper 2016

[2] DE-P 10 2015 004 752 A1

[3] Barkow, A.; Küfen, J.; Hudecek, J.; Christen, F.: Positionierungssystem für induktives Laden. ATZ, 117. Jahrgang, 2015, S. 46-50

[4] Martinovic, D.; Binz, C.; Reuss, H.-C.: Magnetic Field based Localization of the Charging Coil using Trilateration. Autoreg 2015 - VDI-Berichte 2233. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2015 – ISBN 978-3-18-092233-1, S. 129-140

[5] Freuer, A.; Abu Mohareb, O.; Grimm, M.; Reuss, H.-C.: Project e-smart: an e-mobility research platform for students made by students. eeNews Europe 2012, Online: http://www.eenewsautomotive.com/content/project-e-smart-e-mobility-research-platform-students-made-students-part-1

[6] ARS 300 Fernbereichs Radar Sensor 77 GHz, Prospekt, A.D.C. Automotive Distance Control Systems GmbH, Lindau 2017, Online: http://www.conti-online.com/www/download/industrial_sensors_de_de/themes/download/ars_300_datenblatt_de.pdf

[7] LMS5xx Lasermesstechnik, Prospekt, Sick AG, Waldkirch 2017, Online: https://www.sick.com/media/docs/5/65/165/Product_information_LMS5xx_Laser_Measurement_Technology_de_IM0038165.PDF

[8] Russell, S.J.; Norvig, P.: Artificial Intelligence - A Modern Approach. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 1995

[9] Schröder, J.: Adaptive Verhaltensentscheidung und Bahnplanung für kognitive Automobile. Universität Karlsruhe Diss. Karlsruhe 2009

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Flachheitsbasierte Trajektoriengenerierung und Folgeregelung mit modellprädiktiver und modellfreier Regelung

Dr.-Ing. **Thomas Raste**, Continental Teves, Frankfurt am Main;
Ahmad Tarraf, Institut Regelungstechnik und Mechatronik,
TU Darmstadt

Zusammenfassung

Für die Bewegungssteuerung zum automatisierten Fahren wird eine modulare Regelungsstruktur vorgeschlagen. Das Ziel ist, für die Regelung nur Modelle zu verwenden, die die wesentlichen Effekte beschreiben, aber mit möglichst wenigen Fahrzeugparametern auskommen. Hierdurch soll die Robustheit groß und der Applikationsaufwand für die variantenreichen Modellreihen der Fahrzeughersteller gering gehalten werden. Die modulare Bewegungssteuerung empfängt aus einer übergeordneten globalen Planung diskrete Wegpunkte und ein Wunsch-Geschwindigkeitsprofil, welche mit einem flachheitsbasierten Ansatz zu Referenztrajektorien für eine modellprädiktive Regelung verarbeitet werden. Die Ausgangssignale dieses Reglermoduls sind Führungsgrößen für neue unterlagerte Regler, die auf dem Ansatz der modellfreien Regelung basieren. Die Vorteile und Einschränkungen dieser modularen, kaskadierten Bewegungssteuerung werden diskutiert.

Schlüsselwörter: Differenzielle Flachheit, Modellprädiktive Regelung, Modellfreie Regelung.

1 Einleitung

Die Bewegungssteuerung für das automatisierte Fahren ist ein aktuelles Entwicklungsthema bei vielen Fahrzeugherstellern und Zulieferer, z.B. [1]. Sie geht zurück auf Erfahrungen mit Assistenzsystemen wie Active Cruise Control [2] oder Lane Keeping Assist [3]. Continental entwickelt ein System, das leicht applizierbar und über viele Baureihen hinweg ohne Änderungen robust funktionieren soll. Eine Konsequenz daraus ist, dass Modellparameter der Fahrdynamik, wie Masse und Reifensteifigkeiten, zur Reglerauslegung möglichst nicht zu verwenden sind. Darüber hinaus sind standardisierte Schnittstellen anzustreben, um leichtere Austauschbarkeit der Module gegen leistungsfähigere zu ermöglichen.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2 Fahrzeugbewegung

2.1 Ebene Bewegung eines Fahrzeugs

Ziel der Bewegungssteuerung ist die Beeinflussung der Bahn des als starrer Körper angenommenen Fahrzeugs. Das nichtlineare Einspurmodell beschreibt hier eine ebene Fahrzeugbewegung und setzt sich zusammen aus drei Differenzialgleichungen für die Kinematik und drei für die Fahrzeugdynamik, wobei letztere sich aus den Kräfte- und Momentengleichgewichten im bzw. um den Schwerpunkt ergeben [4]. Zustandsgrößen für die Kinematik sind die kartesischen Positionen des Schwerpunkts und der Gierwinkel. Als dynamische Zustandsgrößen werden hier die Fahrzeuggeschwindigkeit, der Schwimmwinkel und die Gierrate gewählt. Die Stellgrößen zur Beeinflussung der Fahrzeugbewegung sind der Lenkwinkel und eine Summenlängskraft bzw. ein entsprechendes Radmoment als Antriebs- oder Bremsmoment.

2.2 Kinematisches Fahrzeugmodell

Zur Modularisierung der Bewegungssteuerung kann man ausnutzen, dass die Regelstrecke in zwei Teilsysteme zerfällt, die einseitig verkoppelt sind. Das Teilsystem Fahrzeugdynamik beeinflusst die Fahrzeugkinematik, erfährt jedoch selbst keine Rückkopplung aus dieser. d.h. die Dynamik ist in erster Näherung unabhängig von der Lage des Fahrzeugs. Die Fahrzeugkinematik ist ein geeignetes modulares Modell, weil nur Zustandsgrößen verknüpft und keine Parameter benötigt werden. Die dynamischen Zustandsgrößen werden als Eingangs- bzw. Stellgrößen des kinematischen Fahrzeugmodells interpretiert. Hierbei sind Fahrzeuggeschwindigkeit und Gierrate die beiden Stellgrößen. Der Schwimmwinkel wird als Störgröße betrachtet und für die weiteren Betrachtungen als vernachlässigbar angesehen.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3 Flachheitsbasierte Trajektoriengenerierung

3.1 Vorgabe von Wegpunkten und Geschwindigkeitsprofil

Wegpunkte beschreiben die geometrische Fahrzeug-Referenzposition in einem inertialen kartesischen Koordinatensystem. Ziel der Folgeregelung ist es, die Referenzpositionen zu genau festgelegten Zeitpunkten zu erreichen. Deshalb ist zusätzlich zu den Positionen die Vorgabe eines Geschwindigkeitsprofils notwendig. Die diskreten, raumbezogenen Daten werden als Funktion der zu fahrenden Strecke, d.h. der Bogenlänge, von einer übergeordneten Planung ermittelt. Diese Planung wird als gegeben vorausgesetzt und nicht weiter beschrieben.

3.2 Flache Beschreibung des kinematischen Fahrzeugmodells

Differenzielle Flachheit erlaubt, sämtliche Zustands- und Eingangsgrößen eines Systems in Abhängigkeit eines flachen Ausgangs und seiner Zeitableitungen darzustellen [5]. In der Regel werden so viele flache Ausgangsgrößen benötigt, wie das System Eingangsgrößen besitzt. Die Flachheitseigenschaft vereinfacht die Erzeugung von Referenztrajektorien denen das System folgen kann, weil hierzu einfache algebraische Zusammenhänge programmiert werden können und keine Differenzialgleichungen numerisch gelöst werden müssen [6]. Für das kinematische Fahrzeugmodell ist die Position ein flacher Ausgang.

3.3 Parametrierung des flachen Ausgangs mit Splines

Splines eignen sich sehr gut für die Parametrierung des flachen Ausgangs, weil die Ableitungen ohne numerisches Differenzieren leicht gewonnen werden können. Um definierte Referenztrajektorien für den gesamten Geschwindigkeitsbereich zu erhalten, wird die geometrische von der zeitlichen Pfadinformation separiert. Hierzu müssen die Referenztrajektorien mit der Bogenlänge umparametriert werden [7]. Die Zeitinformation steckt jetzt in der zeitlichen Änderung der Bodenlänge.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4 Modellprädiktive Folgeregelung

4.1 Linear-zeitvariantes Fahrzeugmodell

Ausgangspunkt für die Trajektorien-Folgeregelung ist das kinematische Fahrzeugmodell, das mit dem expliziten Eulerverfahren diskretisiert und anschließend entlang der Referenztrajektorie linearisiert wird [8]. Das Ergebnis ist ein diskretes lineares zeitvariantes Systemmodell, das die Abweichungen zur Solltrajektorie beschreibt.

4.2 Formulierung und Lösung des Optimierungsproblems

Die Modellprädiktive Regelung optimiert online in jedem Abtastschritt den Stellgrößenverlauf für einen endlichen Prädiktionshorizont und nutzt das Systemmodell zur Bestimmung des zukünftigen Ausgangsgrößenverlaufs. Die Optimierung wird als quadratisches Programm formuliert für das sehr effiziente Lösungsalgorithmen zur Verfügung stehen [9]. Die „Stapelform“ des Systemmodells für den Prädiktionshorizont und die Aufstellung der Matrizen und Vektoren für das Optimierungsproblem werden dargestellt.

5 Modellfreie Fahrzeugregelung

5.1 Lokales Modell mit unbekannter Systemdynamik

Die nichtlineare Fahrzeugdynamik wird für die Längs- und Querbewegung getrennt lokal approximiert durch jeweils ein einfaches lokal gültiges Modell erster Ordnung für die Fahrzeuggeschwindigkeit bzw. Gierrate [10]. Der Systemeingang wird als affin betrachtet und alle Kopplungs- und Störeinflüsse durch einen unbekannten Term repräsentiert. Einziger Parameter des Modells ist ein als konstant angesehener Faktor vor dem Systemeingang. Als Systemeingänge dienen die Stellsignale Radmoment und Lenkwinkel.

5.2 Schätzung der unbekannten Systemdynamik

Zur Schätzung wird angenommen, dass die unbekannte Systemdynamik in einem sehr kleinen Zeitfenster, z.B. zwischen zwei Abtastzeitpunkten, konstant ist. Ein spezielles Filter liefert eine Approximation auf der Basis der Stell- und Messgröße. Der Aufbau des Filters wird ausführlich erläutert.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5.3 Regelung der Längs- und Querdynamik

Die modellfreie Regelung besteht aus einer Vorsteuerung mit der Ableitung des Referenzsignals, der Aufschaltung der Schätzung der unbekannten Systemdynamik und einem PID-Regler für die Regelabweichung. Die Vorsteuerung und Aufschaltung geschieht direkt, d.h. ohne Gewichtungsfaktoren. Die Referenzsignale für die Fahrzeuggeschwindigkeit und Gierrate stammen aus der modellprädiktiven Regelung.

6 Implementierung und Ergebnisse

6.1 Kaskadierte Gesamtregelstruktur

Die Gesamtregelstruktur ist in mehreren Ebenen als kaskadiertes Regelsystem organisiert. Die äußere Kaskade regelt die Position und Orientierung des Fahrzeugs und die innere Kaskade die Längs- und Querdynamik. Besondere Erfahrungen bei der Implementierung werden beschrieben.

6.2 Ergebnisse

Anhand ausgewählter Testfälle werden die Ergebnisse aus Simulation und Fahrversuch erläutert. Die Testfälle beinhalten einen weiten Bereich an Straßenkrümmungen und Fahrgeschwindigkeiten sowie Fahrzeugparameter z.B. durch variierende Fahrzeugbeladung. Als externe Störungen werden Steigungen, Steilkurve und Seitenwind betrachtet.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literatur

[1] Rathgeber, C.; Winkler, F.; Odenthal, D.; Müller, S.: Lateral Trajectory Tracking Control for Autonomous Vehicles. European Control Conference, Strasbourg, 2014.

[2] Winner, H.; Schopper, M.: Adaptive Cruise Control. In: Winner, H. Hakuli, S.; Lotz, F.; Singer, C. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 3. Aufl. Springer, Wiesbaden, 2015, S. 851-891.

[3] Müller, T.; Rohleder, D.: Automatisches Spurfahren auf Autobahnen. In: Isermann, R. (Hrsg.): Fahrdynamik-Regelung. Vieweg, Wiesbaden, 2006, S. 285-306.

[4] Wey, T.: Nichtlineare Regelungssysteme. Teubner, Stuttgart, 2002.

[5] Zeitz, M.: Differenzielle Flachheit: Eine nützliche Methodik auch für lineare SISO-Systeme. Automatisierungstechnik at, Nr. 1, 2010.

[6] De Dona, J.A.; Suryawan, F.; Seron, M.M.; Levine, J.: A flatness-based iterative method for reference trajectory generation in constraint NMPC. Int. Workshop on Assessment and Future Directions of NMPC. Pavia, 2008

[7] De Luca, A.; Oriolo, G.; Samson,C.: Feedback Control of a Nonholonomic Car-Like Robot. In: Laumond, J.-P. (ed.): Robot Motion Planning and Control, Springer, 1998.

[8] Kühne, F.; Lages, W.F.; Da Silva, J.M.G.: Mobile Robot Trajectory Tracking using Model Predictive Control. Joint Conf. VII SBAI/II IEEE LARS, Sao Luis, 2005.

[9] Ferreau, H.J.: An Online Active Set Strategy for Fast Solution of Parametric Quadratic Programs with Applications to Predictive Engine Control. Diplomarbeit, Fakultät für Mathematik und Informatik, Ruprechts-Karls Universität, Heidelberg, 2006.

[10] Fliess, M.; Join, C.: Model-free control. arXiv:1305.7085v2 [math.OC], 2013.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Modellbildung und Regelung eines Freikolbenlineargenerators

Modeling and Control of a Free-Piston Linear Generator

M.Sc. **Martin Keller**, Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Dirk Abel**,
Dr.-Ing. **Thivaharan Albin**,
Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen University, Aachen;
Dipl.-Ing. **Bernhard Jochim**, Dr.-Ing. **Joachim Beeckmann**,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Heinz Pitsch**,
Institut für Technische Verbrennung, RWTH Aachen University, Aachen

Kurzfassung

Auf der Suche nach immer effizienteren Verbrennungsmotoren sind Freikolbenlineargeneratoren (FKLG) ein sehr innovatives Konzept und eine vielversprechende Alternative zu konventionellen Verbrennungsmotoren. FKLG erzeugen, anders als herkömmliche Verbrennungsmotoren, direkt elektrische Energie. Diese Eigenschaft macht FKLG besonders für den Einsatz als kompakten Range-Extender in Hybridfahrzeugen geeignet, da die bisher übliche Kombination aus konventionellem Verbrennungsmotor und daran gekoppeltem Generator entfällt.

Der vorliegende Beitrag stellt das prinzipielle Konzept sowie einen Modellierungsansatz für FKLG vor, welcher auf Basis physikalischer Gleichungen die innerzyklischen Prozesse abbildet, und somit das System FKLG zyklusaufgelöst beschreibt. Darauf aufbauend wird eine Regelung für die Kolbenbewegung entwickelt, welche durch kombinierte Vorsteuerung und PI-Regelung Arbeitspunkte stationär einregelt und Arbeitspunktwechsel ermöglicht. Abschließend wird die Regelung anhand des entwickelten Modells am virtuellen Prüfstand validiert.

Abstract

In search of more and more efficient combustion engines, free-piston linear generators (FPLG) are an innovative concept and a promising alternative to conventional internal combustion engines (ICE). In contrast to traditional ICEs, FPLG directly produce electric energy.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

This characteristic makes FPLG very suitable for the use as compact range extender in hybrid vehicles, because the combination of ICE and coupled generator is omitted.

The contribution at hand presents the basic concept as well as an approach for modeling of FPLG based on physical equations, which describe the inner-cyclic processes. Based on that a control concept for the piston movement is proposed, which is based on a combined PI-feedback and feedforward controller. With this control, stationary operating point and load-transients are possible. Afterwards the control is validated on a virtual test bench.

1. Einleitung

In Zeiten knapper werdender Ressourcen und immer strengerer gesetzlicher Grenzwerte für Emissionen von Verbrennungsmotoren sind in den vergangenen Jahren Freikolbenlinear-generatoren (FKLG) in den Fokus der Forschung gerückt. Neben der kompakten Bauweise als Verbrennungsmotor-Generator-Einheit, zeichnen sich FKLG durch das Fehlen einer Kurbelwelle aus, wodurch die Bewegung des Kolbens keine kinematische Kopplung besitzt. Aufgrund dieses zusätzlichen Freiheitsgrades besitzt ein FKLG zahlreiche Vorteile gegenüber konventionellen Verbrennungsmotoren mit Kurbeltrieb. FKLG können variable Hübe, Trajektorienverläufe und zusätzlich, bei variablem Ventiltrieb, unterschiedliche Verdichtungsverhältnisse realisieren. Außerdem werden aufgrund der linearen Bewegung des Kolbens Reibungsverluste reduziert. Damit können Freikolbenmotoren durch Softwareanpassung verschiedene Treibstoffarten verwenden. Variable Zylindervolumina ermöglichen Online-Downsizing-Konzepte, die vor allem im Teillastbereich höhere Wirkungsgrade ermöglichen [1].

Dem gegenüber stehen einige Herausforderungen, die es zu lösen gilt, um von den oben genannten Vorteilen profitieren zu können. Aufgrund der freien Kolbenbewegung ist, vor allem im Hinblick auf die Betriebssicherheit, eine geeignete und robuste Systemregelung erforderlich. Hierbei ist es von entscheidender Bedeutung die definierten oberen und unteren Totpunkte möglichst exakt zu treffen und Kollisionen des Kolbens mit den Zylinderköpfen bzw. Ventiltrieben zu verhindern [2]. Zur Auslegung der Regelung wird ein Modell benötigt, welches das Prozessverhalten des FKLGs möglichst exakt nachbildet. Ein Modell der Benzinverbrennung wurde bereits in [3] vorgestellt. Dieses wird in dieser Arbeit genutzt und auf andere Brennverfahren erweitert. Mit Hilfe dieses Modells wird jeweils eine PI-Reglerstruktur mit Vorsteuerung zur Regelung des oberen und unteren Totpunkts implementiert.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Systembeschreibung

Das in dieser Arbeit betrachtete System besteht in Anlehnung an [3] aus drei Teilsystemen: Verbrennungszylinder, Gasfeder und Lineargenerator. Bild 1 zeigt die Prinzipskizze des hier untersuchten Systemaufbaus.

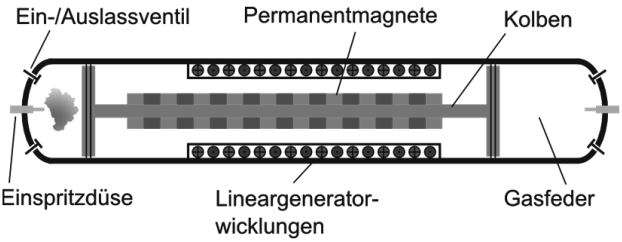


Bild 1: Prinzipskizze und Komponenten des betrachteten Freikolbenlinergenerators

Durch die Treibstoffeinspritzung wird dem System Energie zugeführt. Bei der Verbrennung entsteht im Verbrennungszylinder ein hoher Druck, wodurch der Kolben in Richtung Gasfeder beschleunigt wird. Dabei wird durch die auf dem Kolben befindlichen Permanentmagnete in den Lineargeneratorwicklungen ein Stromfluss induziert und der Kolben gebremst. Die Gasfeder bremst den Kolben zusätzlich und dient gleichzeitig als Energiespeicher um den Kolben zurück in Richtung Verbrennungszylinder zu beschleunigen um die nächste Verbrennung zu initiieren. Somit arbeitet der FKLG im 2-Takt Betrieb, was ihn ebenfalls von aktuellen konventionellen Verbrennungsmotoren für Generatoranwendungen unterscheidet. Demnach findet der Ladungswechsel am Ende eines jeden Arbeitsspiels statt. Die Realisierung des Ladungswechsels ist also anspruchsvoller als bei 4-Takt Motoren, wodurch weitere Überlegungen im Hinblick auf den Spülgrad nötig werden.

Im Gegensatz zu konventionellen Verbrennungsmotoren, bei der die im Treibstoff chemisch gebundene Energie zunächst in Rotationsenergie der Kurbelwelle transferiert wird, wandeln FKLG die chemische Energie direkt in elektrische Energie. Diese Energie kann direkt als elektrische Energie sowie für Nebenaggregate genutzt werden. Außerdem besteht der FKLG aus weniger bewegten Teilen, wodurch die Reibungsverluste reduziert werden.

3. Physikalische Modellierung des Prozesses

Verbrennungsprozesse sind multiphysikalische Prozesse, die auf chemischen, thermodynamischen und mechanischen Gesetzen basieren. Das verwendete zeitkontinuierliche physika-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

lische Modell beschreibt die innerzyklischen Prozesse der Teilkomponenten. Ausgangspunkt für die Modellbildung ist der freigeschnittene Kolben mit den angreifenden Kräften in Bild 2.

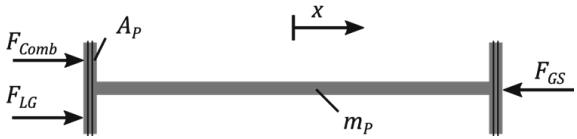


Bild 2: Freikörperbild mit den auf den Kolben wirkenden Kräften

Damit lässt sich das Kräftegleichgewicht zu

$$m_P \ddot{x} = F_{Comb} + F_{LG} - F_{GS} \tag{1}$$

bestimmen.

Dabei beschreibt F_{Comb} die Kraft aufgrund des Druckes im Verbrennungszylinder, F_{GS} die Kraft, die durch den Druck in der Gasfeder auf den Kolben wirkt und F_{LG} die Lineargeneratorkraft.

Die Modellierung von F_{Comb} und F_{GS} erfolgt mit Hilfe eines 0D Modells, welches auf dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, sowie dem idealen Gasgesetz basiert:

$$\begin{gathered} m c_v \dot{T} + u \dot{m} + \sum_i (h_i \dot{m}_i)_{\text{in}}^{\text{out}} = -p \dot{V} + \dot{Q}_{Comb} + \dot{Q}_{Wall} \\ p \dot{V} + V \dot{p} = mR \dot{T} + RT \dot{m} + mT \dot{R} \end{gathered} \tag{2}$$

Die Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}_{Comb}$ wird über den Ersatzbrennverlauf nach Vibe berechnet [4]. Weitere Informationen zur Modellierung können [5] entnommen werden. Tabelle 1 enthält eine Übersicht der im Modell verwendeten Variablen und Zustandsgrößen.

Bei der Modellierung der Gasfederkraft F_{GS} wird lediglich die Wärmefreisetzungsrate zu Null gesetzt. Die Dynamik des Lineargenerators wird aufgrund der kleinen Zeitkonstanten vernachlässigt [2]. Somit wird angenommen, dass die vorgegebene Lineargeneratorkraft sofort auf den Kolben wirkt.

Die Modellgleichungen der Teilsysteme sind nach Gleichung (1) über den frei beweglichen Kolben gekoppelt. Die modulare Beschreibung über Teilkomponenten ermöglicht schnelle Änderungen am Gesamtaufbau bzw. an einzelnen Komponenten, wodurch beispielsweise ein zweiter Brennraum anstelle der Gasfeder schnell umsetzbar ist.

Für den Entwurf der Regelungen, die anschließende simulative Vorparametrierung in einem virtuellen Prüfstand und der Validierung des Regelungskonzeptes wird das oben beschriebene Modell genutzt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 1: Übersicht zu den verwendeten Modellvariablen und Zustandsgrößen

c_v	Spez. Wärmekapazität	p	Druck im Zylinder
F_{Comb}	Kraft auf Kolben durch Verbrennung	$\dot{Q}_{Comb}$	Wärmefreisetzungsrate durch Verbrennung
F_{GS}	Kraft auf Kolben durch Gasfeder	$\dot{Q}_{Wall}$	Wandwärmeverluststrom
F_{LG}	Kraft auf Kolben durch Lineargenerator	R	Spez. Gaskonstante
h_i	Spez. Enthalpie der i-ten Partialmasse	u	Spez. innere Energie
m_P	Kolbenmasse	T	Temperatur im Zylinder
m_i	Masse der i-ten Partialmasse	V	Volumen des Zylinders
m	Gesamtluftmasse im Zylinder	$x, \ddot{x}$	Kolbenposition und -beschleunigung

4. Regelungskonzept

4.1 Beschreibung des Regelungsproblems

Aus regelungstechnischer Sichtweise wird der FKLG von steifen, instabilen und nichtlinearen Differentialgleichungen beschrieben. Dies stellt zum einen Herausforderungen an die Regelung zum anderen aber auch an die Simulation selbst. Für die numerische Simulation des steifen Systems muss einerseits eine ausreichend kleine Abtastzeit gewählt werden, um alle Vorgänge während des Verbrennungszyklus abzubilden. Andererseits sollte sie auch nicht zu klein gewählt werden, um eine Vielzahl von Zyklen in einer angemessenen Zeitspanne simulieren zu können.

Die fehlende kinematische Kopplung der Kolbenbewegung stellt die größte und zugleich sicherheitskritischste Herausforderung für die Regelung dar. Der Regelung kommt also die Aufgabe der elektronischen bzw. virtuellen Kurbelwelle für den FKLG zu, die die Bewegung des Kolbens sinnvoll begrenzt. Für die Realisierung von FKLG nimmt die Regelungstechnik also eine zentrale Stelle ein und dient somit als Enabler für dieses Motorenkonzept.

Wie oben bereits beschrieben, müssen die definierten Positionen für den oberen sowie unteren Totpunkt (OT bzw. UT) im Betrieb möglichst genau getroffen werden um die Verbrennung im nächsten Zyklus zu garantieren und um Zyklus-zu-Zyklus-Schwankungen zu minimieren.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Grenzen für die Abweichungen der Kolbenpositionen im OT und UT sind aus [2] entnommen. Für den OT im stationären Betrieb sind die Grenzen $|e_{OT,SS}| \leq 0{,}1\ mm$, im lasttransienten Betrieb $|e_{OT,trans}| \leq 0{,}25\ mm$. Für den UT liegt die maximal zulässige Abweichung bei $|e_{UT}| \leq 1.0\ mm$. Somit ist die Grenze für den UT weniger streng, da hier keine Verbrennung stattfindet, dennoch sollte der UT auch möglichst exakt getroffen werden um die oben erwähnten Zyklus-zu-Zyklus-Schwankungen zu minimieren.

4.2 Umgesetztes Regelungskonzept

Um den FKLG zu stabilisieren wird ein kombinierter PI-Regler mit Vorsteuerung vorgeschlagen, der jeweils den OT bzw. UT regelt. Die Stellgrößen zur Regelung des OTs sind die eingespritzte Treibstoffmenge je Zyklus und der Druck in der Gasfeder im entspannten Zustand (also im OT) zur Regelung des UTs [6].

Die verwendete Regelungsstruktur für OT und UT kann Bild 3 entnommen werden. Der Regler besteht aus einem Rückkopplungs- und einem Vorsteuerungsteil. Der PI-Regler sichert die Einhaltung der Grenzen für die Abweichungen von OT und UT, während die Vorsteuerung die Treibstoffmenge bzw. den Druck in der Gasfeder linear in Abhängigkeit der elektrischen Leistung P_{LG} des Lineargenerators einstellt.

Mit dieser Konfiguration sind stationäre Arbeitspunkte als auch Last-Transiente realisierbar. In diesem Konzept wird die Lineargeneratorkraft F_{LG} als Störgröße aufgefasst. Tabelle 2 fasst die Stell-, Regel-, Soll- und Störgrößen des Regelungskonzepts zusammen.

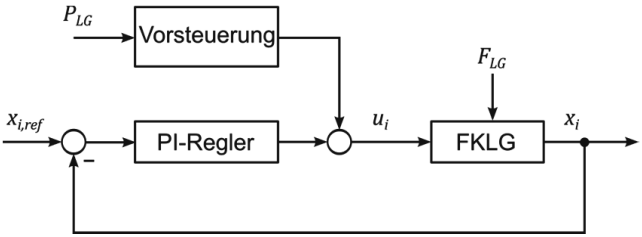


Bild 3: Struktur des umgesetzten Regelungskonzepts zur Regelung von OT und UT. Der Index i beschreibt die Unterscheidung für OT bzw. UT ($i \in \{OT, UT\}$)

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 2: Stell-, Regel-, Soll- und Störgrößen des Regelungskonzepts

$x_{i,ref}$	Sollposition für OT	x_i	Gemessene OT-Position (Regelgröße)
	Sollposition für UT		Gemessene UT-Position (Regelgröße)
u_i	Eingespritzte Treibstoffmenge pro Zyklus (Stellgröße OT)	P_{LG}	Entnommene elektrische Leistung als Eingangsgröße für die Vorsteuerung
	Druck der Gasfeder im entspannten Zustand (Stellgröße UT)	F_{LG}	Extern einstellbare Kraft des Lineargenerators (Störgröße)

Dass eine Regelung für FKLG zwingend nötig ist, wird anhand von Bild 4 deutlich. Hier sind die Simulationsergebnisse des lediglich vorgesteuerten Lineargenerators für einen Arbeitspunktwechsel von 2 kW auf 10 kW elektrische Leistung des Lineargenerators dargestellt. Es wird deutlich, dass die Grenzen für OT mit der Vorsteuerung nicht eingehalten werden können. Im Extremfall kann es somit zu Anschlägen des Kolbens an den Zylinderköpfen oder zum Stillstand des FKLGs kommen. Vor allem Kollisionen sind unbedingt zu vermeiden, da hierdurch erhebliche Schäden entstehen. Außerdem erreicht der Druck im Verbrennungszylinder aufgrund der Überschreitung des OTs bei diesem Teillastpunkt bereits Maximalwerte von $p_{Comb,max} \approx 130\ bar$.

Zusätzlich erhöht eine Vorsteuerung den Ladedruck linear zu höheren Ladedrücken für höhere Lasten und die Position, an der das Auslassventil öffnet, wird nach vorne verschoben, um einen ausreichenden Ladungswechsel bei höheren Lasten sicherzustellen.

Mit dem vorgestellten Regelungskonzept sind zwei Stelleingriffe pro Zyklus realisierbar, da die OT- und UT-Position jeden halben Zyklus gemessen werden können. Somit sind innerzyklische Eingriffe mit dem beschriebenen Konzept nicht möglich. Dennoch ermöglicht das Regelungskonzept eine Simulation des stabilisierten FKLGs, wodurch das dynamische und thermodynamische Verhalten bei stationären Arbeitspunkten und während Arbeitspunktwechseln zwischen unterschiedlichen Lasten untersucht werden können.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

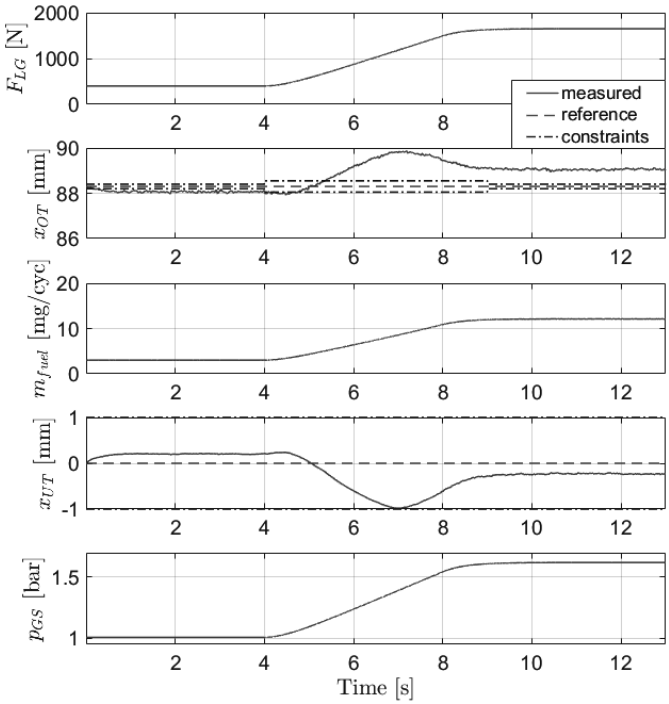


Bild 4: Verläufe von Lineargeneratorkraft, OT- und UT-Positionen, sowie der jeweiligen Stellgrößen eingespritzte Treibstoffmasse pro Zyklus und Druck in der Gasfeder im entspannten Zustand für einen Arbeitspunktwechsel im vorgesteuerten Fall

5. Simulative Validierung des Regelungskonzepts

Die Validierung des vorgestellten Regelungskonzeptes erfolgt simulativ am virtuellen Prüfstand. Der Startvorgang des FKLGs wird durch großen Druck in der Gasfeder initiiert, welcher den Kolben in Richtung OT beschleunigt und so die erste Verbrennung ermöglicht. Bild 4 zeigt die Simulationsergebnisse für den geregelten Fall für einen Arbeitspunktwechsel von 2 kW auf 10 kW elektrische Leistung innerhalb von 6 Sekunden. Während des stationären Betriebs werden die Grenzen von $\pm 0{,}1$ mm für die OT-Abweichung eingehalten. Im Laufe der Laständerung bleibt der OT innerhalb des Intervalls von $\pm 0{,}25$ mm.

Das Folgeverhalten der Laständerung ist vor allem aufgrund der Vorsteuerung zufriedenstellend. Somit muss die Regelung nur kleine Abweichungen korrigieren. Der Ladedruck für den 10 kW Arbeitspunkt beträgt $p_{boost} = 1{,}5$ bar.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

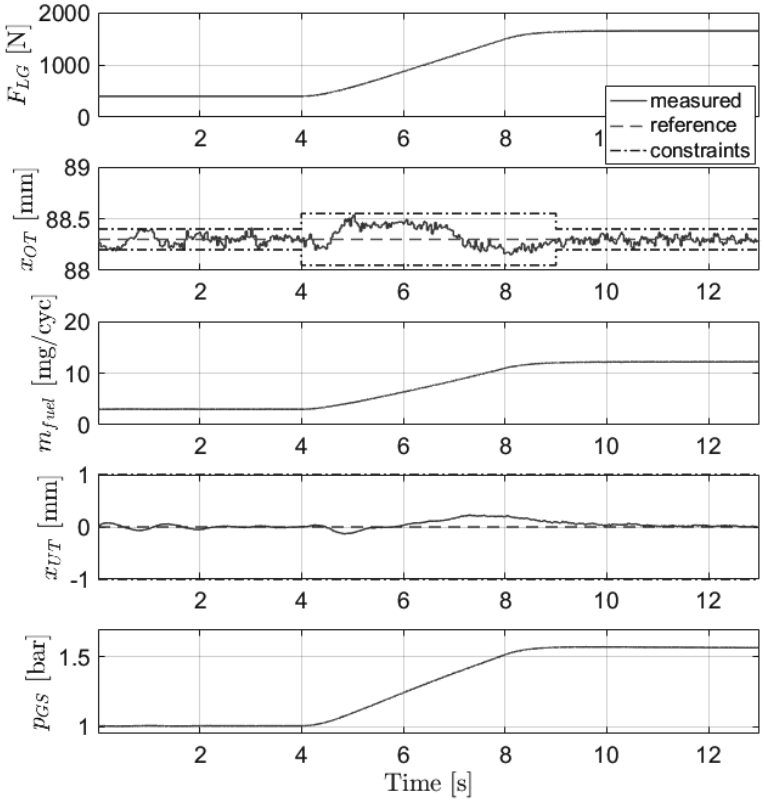


Bild 4: Verläufe von Lineargeneratorkraft, OT- und UT-Positionen, sowie der jeweiligen Stellgrößen eingespritzte Treibstoffmasse pro Zyklus und Druck in der Gasfeder im entspannten Zustand für einen Arbeitspunktwechsel im geregelten Fall

Durch die Laständerung von 2 auf 10 kW steigt die Frequenz von 28 auf 35 Hz (1700 auf 2120 min^{-1}). Der Wirkungsgrad des FKLG von der Verbrennung bis zum mechanischen Teil des Lineargenerators beträgt ca. 54 %.

Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, erlaubt das vorgestellte Modell innerzyklische Einblicke in den Verbrennungs- sowie Gasfederzylinder. Bild 5 zeigt sowohl die Verläufe von Druck, Temperatur und Luftmasse im Verbrennungsraum (links), als auch die Änderungen der Massenbrüche durch die Verbrennung und den Ladungswechsel (rechts). Die Zyklus-zu-Zyklus-Schwankungen sind deutlich im Druckverlauf erkennbar. Der Maximaldruck schwankt von

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

etwa 85 bar im ersten Zyklus auf ca. 100 bar im zweiten und etwa 90 bar im dritten abgebildeten Zyklus.

Zusammenfassend beschreibt das Modell die innerzyklischen Prozesse ausreichend detailliert. Die Reglerstruktur ermöglicht einen stabilen stationären als auch transienten FKLG-Betrieb.

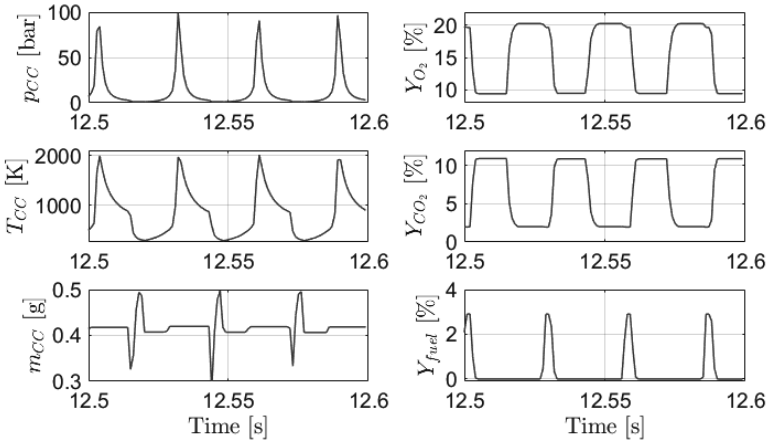


Bild 5: Innerzyklische Verläufe von Druck, Temperatur und Luftmasse im inneren des Verbrennungszylinders (links); Verläufe der Massenbrüche O_2, CO_2 und Treibstoff (rechts) jeweils für den geregelten Betrieb

6. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Modellierung sowie ein Regelungskonzept von Freikolbenlineargeneratoren vorgestellt. Das Modell besteht aus bekannten und bewährten 0D Verbrennungsgleichungen, wobei die Grad Kurbelwellenabhängigkeit aufgrund der freien Kolbenbewegung durch eine Zeitabhängigkeit ersetzt wird. Das Modell beschreibt die innerzyklischen Prozesse im FKLG. Das vorgestellte Regelungskonzept ist in der Lage den FKLG sowohl für stationäre Arbeitspunkte als auch für Last-Transiente zu stabilisieren. Dabei wird auch hervorgehoben, warum zwingend eine Regelung erforderlich ist.

Die Validierung der Regelung am virtuellen Prüfstand zeigt die prinzipielle thermodynamische Machbarkeit von FKLG. Nichtdestotrotz sind weitere Verbesserungen sowohl am Modell als auch an der Regelung nötig. In einem nächsten Schritt sollte das Verbrennungsmodell weiter detailliert werden, um bspw. die Verbrennung prädiktiv simulieren zu können. Außerdem sollte das Regelungskonzept um den Lineargenerator als Aktor erweitert werden, da

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

dieser in der Lage ist innerzyklisch die Kolbenbewegung zu beeinflussen und so die auftretenden Zyklus-zu-Zyklus-Schwankungen zu reduzieren.

7. Danksagung

Die hier vorgestellten Untersuchungsergebnisse sind im Rahmen einer Kooperation mit der UMC Universal Motor Corporation GmbH (Anschrift: Marienau 3, D-70563 Stuttgart, E-Mail: umc-group@t-online.de) entstanden.

Literatur:

[1] R. Mikalsen und A. P. Roskilly: A review of free-piston engine history and applications, Applied Thermal Engineering, Volume 27, Issues 14-15, pp. 2339-2352, 2007.

[2] F. Kock: Steuerung und Regelung des Freikolbenlineargenerators - Entwicklungsmethode und Regelungskonzept für den Betrieb eines neuartigen Energiewandlers, Stuttgart: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Bibliotheks- und Informationswesen, 2013.

[3] S.-E. Pohl: Der Freikolbenlineargenerator - Theoretische Betrachtungen des Gesamtsystems und experimentelle Untersuchungen zum Teilsystem der Gasfeder, Hamburg: DLR-Forschungsbericht, 2007.

[4] I. I. Vibe: Brennverlauf und Kreisprozeß von Verbrennungsmotoren, VEB Verlag Technik, 1970

[5] M. Keller, D. Abel, T. Albin, B. Jochim, J. Beeckmann, H. Pitsch: Modeling and Control of a Free-Piston Linear Generator, Symposium of Combustion Control, Aachen, 2017

[6] R. Mikalsen und A.P. Roskilly: The control of free piston engine generator. Part 2: engine dynamics and piston movement control, Applied Energy, 2010

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Nichtlineare adaptive Regelung und Störkraftkompensation für elektrische Gaspfadaktoren

Nonlinear adaptive control and disturbance compensation for electric gas path actuators

Prof. Dr.-Ing. **Martin Grotjahn**, Hochschule Hannover;
Dr.-Ing. **Bennet Luck**, Dr.-Ing. **Matthias Feldt**, IAV Gifhorn

Kurzfassung

Die Emissionen moderner Verbrennungsmotoren hängen entscheidend von der Regelung der dem Motor zu- und abgeführten Gasmassenströme ab, die durch Gaspfadaktoren eingestellt werden. Diese sind zahlreichen nichtlinearen und zeitvarianten Einflüssen ausgesetzt, die von konventionellen kennfeldbasierten Regelungsansätzen nicht systematisch berücksichtigt werden. Daraus folgt eine begrenzte Genauigkeit und Performance der Aktorlageregelung und damit der übergeordneten Gasmassenstromregelung sowie ein hoher Applikations- und Testaufwand im Entwicklungsprozess.

Deshalb wird in diesem Beitrag eine Methodik zur Modellierung und Identifikation von Gaspfadaktoren und den auf sie wirkenden Störkräften sowie eine darauf aufbauende nichtlineare adaptive Regelung und Störgrößenkompensation vorgestellt. Dazu wird die Exakte Linearisierung (EL) mit einer Parameter- und Zustandsschätzung durch ein Extended KALMAN-Filter (EKF) kombiniert. Dadurch wird der Nachteil der EL, die fehlende Robustheit gegenüber Modellunsicherheiten, beseitigt. Durch die systematische Kompensation der Störeinflüsse und nichtlinearen zeitvarianten Effekten werden ein weitgehend lineares zeitinvariantes Verhalten und eine geringe Störsensitivität des Regelkreises erreicht. Das Konzept wird auf einer Rapid-Prototyping-Hardware in Echtzeit erprobt und anhand eines Vergleichs mit einer flachheitsbasierten Zwei-Freiheitsgrad-Regelungsstruktur und dem klassischen Gain-Scheduling-PID-Serienregler bewertet. Die Leistungsfähigkeit und Robustheit werden durch Klimakammer-Tests unter Einbezug von Worst-Case-Szenarien und seriennahe Fahrversuche sichergestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Abstract

Emissions of modern combustion engines are decisively dependent on the precision of mass flow control within the engine's gas path. The mass flows are regulated by gas path actuators. A variety of non-linear and time-varying effects have an impact on the dynamic behaviour of gas path actuators. Conventional linear control approaches, which are gain-scheduled by parameter maps, cannot systematically take into account these influences. This results in limited accuracy and performance of the single actuator control loop and, thus, of the superordinate gas mass flow controller. Additionally, due to strong dependency on operational conditions, high calibration and test efforts result during the development process. To overcome these problems, a methodology for modelling and identification of gas path actuators and the disturbing forces acting on them is presented in this paper. The resulting models are integrated into a nonlinear adaptive control and disturbance compensation scheme. For this purpose, the Exact Linearization (EL) is combined with joint state and a parameter estimation by an Extended KALMAN-Filter (EKF). This eliminates the main disadvantage of EL, the lack of robustness against model uncertainties. Systematic compensation of the disturbing influences and non-linear time-variant effects leads to widely linear time-invariant dynamics of the resulting control loop combined with low disturbance sensitivity. The concept is tested on a real-time rapid prototyping hardware and evaluated by an experimental comparison with a flatness-based two-degree-of-freedom control structure and the classical gain-scheduling PID series controller. Climatic chamber tests including worst-case scenarios as well as near-series driving experiments prove the performance and robustness of the suggested approach.

1. Introduction

Dynamic driving situations become more and more important for the development of modern combustion engines. For example, real-driving emissions (RDE) are established by the EU. These tests include a high amount of accelerations and load changes. During these tests, the control of the correct mixture of fuel, intake air und exhaust gas becomes very challenging. Thus, a complex system with a lot of actuators like throttle valve or turbocharger actuators (see Fig. 1) is established. The control strategy consists of a combined air mass, EGR and boost pressure control, which delivers setpoint values for the subordinate actuator control loops. Especially during dynamic driving situations in strict standard emission tests, the performance of the actuator control loops determines the achievable performance of the superordinate gas path control.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

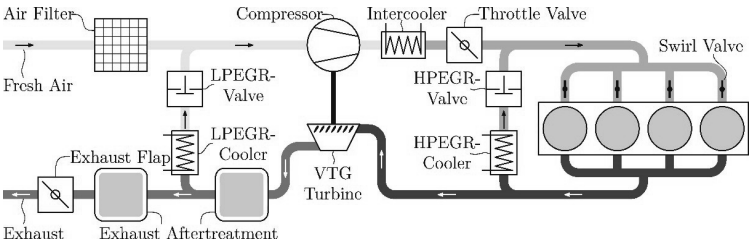


Fig. 1: Exemplary gas path of a modern gasoline engine

However, the actuator control often has to deal with highly nonlinear and time-varying dynamic behaviour. Additionally, the actuators are influenced by severe disturbances like gas forces, temperature driven effects and parameter changes due to ageing and soiling. Furthermore, strongly nonlinear system characteristic results from friction, curved spring characteristics and position dependent transmissions. Furthermore, the trend of downsizing intensifies the impact of nonlinear and time-variant influences and disturbance forces.

This brings linear gain scheduled control approaches conventionally used in car industry to their limitations. These are not able to systematically master the mentioned nonlinear influences. This results in limited control performance. Simultaneously, these approaches lead to a large amount of parameter maps and compensating functions. This yields high calibration and testing efforts for a guarantee of robustness. Performance strongly depends on skills and expertise of the application engineer.

Nevertheless, even more sophisticated approaches in literature remain mainly linear. For example, in [KaBF05] the nonlinearities are compensated by an integrating controller part. A few publications cover nonlinearities by static curves [Feld10, Feld15], sliding mode concepts [HoHR08] or backstepping [MeLB12].

In contrast, this paper presents a complete nonlinear adaptive control approach. It is based on an automated model identification which ensures efficient applicability to a large variety of different automotive actuator types. It linearizes the nonlinear system by Exact Linearization (EL), also known as input-output-linearization. This powerful control method is rarely spread in practice due to its high sensitivity to model uncertainties [Adam14]. To overcome this, the EL is complemented by an Extended Kalman-Filter (EKF). The EKF is designed as joint estimator of state variables and model parameters. Thus, the state and parameter estimates are utilized in the feed-forward and feedback terms of EL. The approach yields nearly optimal exploitation of the actuating variable. It shows almost bang-bang which means time-optimal behaviour.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

As a practical example, the application to a turbocharger wastegate actuator is shown. The control algorithm is implemented in a real-time environment using rapid-prototyping hardware and compared to a flatness-based two-degree-of-freedom approach and a series gain-scheduled PID approach. Tests in a climatic chamber and in series-like driving tests prove the high capacity of the proposed methodology.

2. Modelling

In the following, the general approach for modelling and identification of nonlinear gas path actuators and the application to the sample system is presented. The final subsection shows a scheme for efficient simplified modelling of gas forces which is used for disturbance forwarding in section 4.

2.1 Modelling of electrical gas path actuators

The overall model consists of an electrical part and a mechanical part. Some electric parameters of the resulting equations (e. g. resistance) typically depend on the motor's temperature. Thus, the electric part dynamics become time-varying.

The electrical and the mechanical subsystem are usually coupled by torque generation from motor current or magnet field, respectively, and induced voltage depending on motor velocity. Although there exist a lot of nonlinear effects, for (BL)DC-motors, the coupling and the electric dynamics remain mainly linear. If this approach is not sufficient, nonlinear electrical influences can be taken into account similar to mechanical nonlinearities shown in the following.

One of these influences typically results from nonlinear kinematic transmissions in multi-body systems. Thus, forces and torques within the kinematic structure do not necessarily act on the motor or the gear shaft. Consequently, these forces[1] have to be projected into the motor direction. JOURDAIN's principle of virtual power is known to be very effective for this projection without necessity of considering reacting forces [Brem88, LuGr15, PfSc14]. JOURDAIN's principle considers the power generated by virtual infinitesimal small velocities $\delta\dot{\boldsymbol{x}}$ and the forces in the correspondent directions $\boldsymbol{\mathcal{F}}_x$. Due to power conservation, this power must be equal to the virtual power generated in the direction of some kinematically compatible virtual velocities $\delta\dot{\boldsymbol{y}}$ and the corresponding forces $\boldsymbol{\mathcal{F}}_y$. Thus, the forces $\delta\boldsymbol{\mathcal{F}}_y$ can be transferred into equivalent forces $\delta\boldsymbol{\mathcal{F}}_x$ by the JACOBIAN $\frac{\partial\dot{\boldsymbol{x}}}{\partial\dot{\boldsymbol{y}}} = \frac{\partial\boldsymbol{x}}{\partial\boldsymbol{y}}$:

[11] The expression "forces" also comprises torques in the following.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$\delta \dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\mathcal{F}}_x = \delta \dot{\boldsymbol{y}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\mathcal{F}}_y \;\Leftrightarrow\; \boldsymbol{\mathcal{F}}_x = \left(\frac{\partial \boldsymbol{x}}{\partial \boldsymbol{y}}\right)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\mathcal{F}}_y \tag{1}$$

Another important nonlinear effect is friction. For drive systems, typically, friction torques can be modelled as a function only of joint velocities. A widespread detailed model is the friction characteristic depicted in Fig. 2. It consists of dry friction, viscous damping and a transition from static to dynamic friction, the so-called STRIBECK-effect [ArDD94].

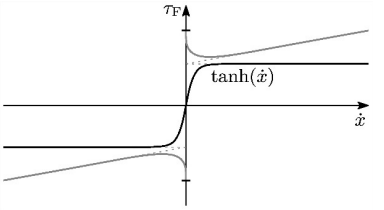


Fig. 2: Velocity dependent friction model

Continuous differentiability is important for implementation within an EKF (see sec. 3). Therefore an approximation is utilized, e. g.:

$$\tau_{\mathrm{f}}(\dot{x}) \approx k_{\mathrm{f}} \tanh(b\dot{x}) \tag{2}$$

The factor b makes scaling of the slope for low velocities possible. The parameter k_{f} allows the adaptation to different friction conditions, for example due to varying temperature (see Fig. 2). Although eq. (2) is a significant simplification, it is a suitable approximation for many control applications.

Here a turbocharger wastegate actuator serves as example of a typical gas path actuator with nonlinear dynamics. The actuator (see Fig. 3) is powered by a DC-motor with the electrical resistance R_{m}, the inductance L_{m} and the motor-constant K_{m}. A linear transmission with the gear ratio i_{g} increases the torque. The moment of inertia I_{r} and friction torque τ_{f} are assumed to be concentrated on the motor shaft whose position is given by the rotational coordinate φ.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

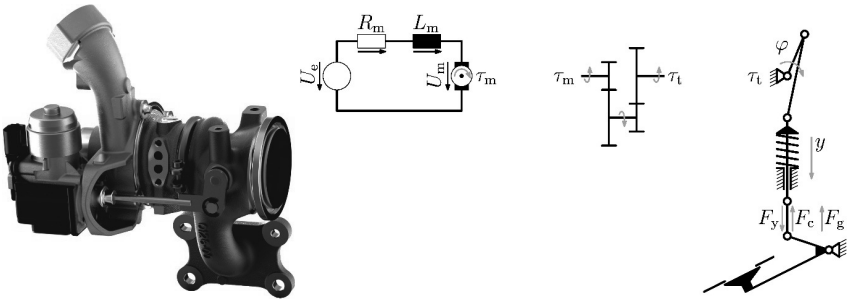


Fig. 3: The turbocharger (left) and a scheme of its actuator (right) [BMTS]

The nonlinear kinematics are modelled by the characteristics $y = g(\varphi)$. On the translational axes y, a spring ratio c and the acting gas force F_g are taken into account. This yields the system equations

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, u) = \begin{pmatrix} \dot{y} \\ \frac{K_\mathrm{m}\, I\, i_\mathrm{g}}{I_\mathrm{r}\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)} - \frac{c y}{I_\mathrm{r}\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2} - \frac{F_\mathrm{g}}{I_\mathrm{r}\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2} - \frac{k_\mathrm{f} \tanh\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\dot{y}\right)}{I_\mathrm{r}\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)} - \frac{\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}\dot{y}^2}{\frac{\partial \varphi}{\partial y}} \\ \frac{R_\mathrm{m}\, I}{L_\mathrm{m}} - \frac{K_\mathrm{m}\, i_\mathrm{g} \frac{\partial \varphi}{\partial y}\dot{y}}{L_\mathrm{m}} + \frac{z}{L_\mathrm{m}} + \frac{u}{L_\mathrm{m}} \\ 0 \end{pmatrix}, \tag{3}$$

$$y = h(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{C}\,\boldsymbol{x} \tag{4}$$

with $\boldsymbol{x} = [y, \dot{y}, I, \mathrm{z}]^\mathrm{T}$ and $\boldsymbol{C} = [1\ 0\ 0\ 0]$, where y is the only measurable quantity and z models the unknown disturbances by an input-free integrator. Hence, the resulting SISO-system has a linear output and is input-affine.

2.2 Identification of the gas path actuator model parameters

In eq. (3), the second and third row are associated with the mechanical and electrical subsystem. This allows to divide the model identification into three sequential steps: identification of kinematics, electrical part and mechanical subsystem.

The kinematic characteristic are measured once by adding an additional sensor on the motor shaft. The electrical identification step consists of a series of actuations with stochastically generated length and direction. Only PWM (pulse width modulation) duty cycles of 100 %, 0 % and +100 % are used in order to avoid PWM-frequency influences in the measured motor current.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

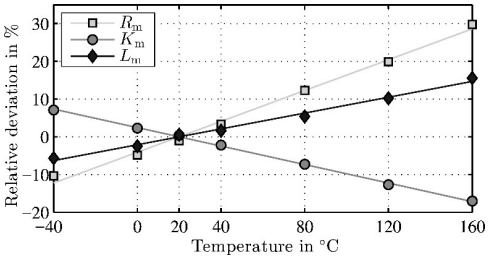


Fig. 4: Relative deviation of electrical parameters

Fig. 4 shows the temperature dependency of the identified electrical parameters. A sensitivity analyses has shown that the temperature variation of L_m has only low impact on the system dynamic. R_m and K_m similarly affect the resulting system gain. Therefore, the influence of their variation is not negligible. Consequently, R_m and K_m are adapted by the EKF (see sec. 3), whereas L_m is assumed to be constant.

The mechanical subsystem is automatically identified by a pseudo-random-binary actuation with varying amplitude [Feld15, KFKE12]. Kinematics, spring characteristics and inertia are approximately constant over the actuator life cycle. However, the system friction is influenced by temperature, ageing and soiling effects. Thus, it is also adapted by the EKF.

2.3 Modelling of gas forces

Gas forces acting on the valve mechanism are one of the major disturbances in particular for actuators in the exhaust gas path due to the occurring great pressures. These disturbance forces are modelled by a grey-box-like approach. The flow between the inlet and outlet section of the regarded valve is divided into flow zones. A flow zone is a part of the valve volume whose inlet and outlet are the geometric sectional areas A_i. Every zone is formulated by one-dimensional flow with simplified wall friction. Pressure-loss-coefficients, which are commonly used for incompressible pipe flow calculations, consider further losses. In this case, the entirety of loss coefficients ζ_t is used to describe the relative distribution of pressure p_i over the sections. Here, the temperature ϑ is assumed as constant and R is the ideal gas constant.

$$p_{\mathrm{i}+1} = \frac{p_\mathrm{i}}{2} + \frac{R\vartheta\dot{m}^2}{4p_\mathrm{i}A_\mathrm{i}^2} + \sqrt{\left(\frac{p_\mathrm{i}}{2} + \frac{R\vartheta\dot{m}^2}{4p_\mathrm{i}A_\mathrm{i}^2}\right)^2 - (1+\zeta_\mathrm{t})\frac{R\vartheta\dot{m}^2}{4p_\mathrm{i}A_{\mathrm{i}+1}^2}} \tag{5}$$

A superior iteration algorithm, calculates the pressure of each section. Afterwards, the simulated differential pressure between the first and the last section is compared to the actual value ($\Delta p = p_\mathrm{in} - p_\mathrm{out}$). If the actual differential pressure is smaller, all loss coefficients are

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

incrementally scaling. When the required value is reached, the resulting pressures of the defined sections are interpolated to achieve a pressure curve along the streamlines. As the flow states are assumed to be homogeneously distributed over a sectional area, the acting gas force is derived by integrating the pressure over the valve body surface. The calculations are performed offline and stored in a map in dependency of valve opening and differential pressure. The gas force from the map is used for compensation in the observer and controller.

The differential pressure needed to interpolate in the map online is estimated by a further EKF. Based on the flow model of the ECU, it observes the pressure in the exhaust manifold using a zero-dimensional model extended by a disturbance estimation z.

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) = \begin{bmatrix} \left(\dot{m}_{\mathrm{in}} - \dot{m}_{\mathrm{out}} - z - \mu A_{\mathrm{v}} p_{\mathrm{exh}} \sqrt{\frac{2}{R\vartheta_{\mathrm{exh}}}} \Psi(\Pi) \right) \frac{R\vartheta_{\mathrm{exh}}}{V_{\mathrm{man}}} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{x} = [p_{\mathrm{exh}} \quad z], \quad y = h(\boldsymbol{x}) = [1 \quad 0]\boldsymbol{x} = p_{\mathrm{exh}} \tag{7}$$

This model assumes the manifold as gas mass storage. The values for input $\dot{m}_{\mathrm{in}}$ and output $\dot{m}_{\mathrm{out}}$ mass flows are determined by the ECU gas model except for the mass flow of the wastegate. In order to consider fast dynamics of the pressure due to fast changes of valve opening area A_{v}, the model is directly coupled to the opening by orifice formula $\Psi(\Pi)$. Accordingly, it is possible to take fast pressure changes in the exhaust manifold into account and further to provide a high dynamic value of the differential pressure over the regarded valve. For more insight see [LuGr14].

3. Parameter adaption by EKF joint estimation

For EL control the whole state vector, which is not completely measurable, has to be observed. The measured sensor signal is relatively noisy. Thus, the state estimation is deteriorated by nonlinear propagation of output noise. Therefore, linear observers become biased. A well-known observer, which is able to deal with nonlinearities and Gaussian process and measurement noise, is the EKF [WeBi95].

The EKF linearizes the system around the current state estimate using a first-order truncation of the multidimensional Taylor series expansion, thus the first-order JACOBIAN is [Merw04]:

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$\boldsymbol{A}_k = \frac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u})}{\partial \boldsymbol{x}}\Big|_{\hat{\boldsymbol{x}}_k,u_k},\ \boldsymbol{C}_k = \frac{\partial \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}\Big|_{\hat{\boldsymbol{x}}_k} \tag{8}$$

Process noise $\boldsymbol{w}$ is assumed as uncorrelated Gaussian noise. Therefore, the JACOBIAN of $\boldsymbol{f}$ with respect to process noise $\boldsymbol{w}$ is assumed to be the identity matrix. Measurement noise v is uncorrelated. The resulting algorithm is divided into the time update

$$\hat{\boldsymbol{x}}_k^- = \boldsymbol{f}(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) \tag{9}$$

$$\boldsymbol{P}_k^- = \boldsymbol{A}_{k-1}\boldsymbol{P}_{k-1}\boldsymbol{A}_{k-1}^T + \mathbf{Q} \tag{10}$$

and the measurement update

$$\boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_k^-\boldsymbol{C}_k^T\big(\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{P}_k^-\boldsymbol{C}_k^T + R\big)^{-1} \tag{11}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}_k = \hat{\boldsymbol{x}}_k^- + \boldsymbol{K}_k\big(z_k - \boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{x}}_k^-)\big) \tag{12}$$

$$\boldsymbol{P}_k = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{C}_k)\boldsymbol{P}_k^- \tag{13}$$

for time step k. Subsequent sensitivity analyses show that the critical model parameters are R_m and K_m, which are affected by actuator temperature. The friction torque τ_f is another important parameter. Aging, soiling and likewise actuator temperature have an impact on τ_f. Thus, the state vector is extended by these parameters combined in a vector $\boldsymbol{p}$. This leads to the new state vector $\boldsymbol{x} = [y, \dot{y}, I, \mathrm{z}, R_\mathrm{m}, K_\mathrm{m}, \tau_\mathrm{f}]^\mathrm{T}$. It is assumed that the parameter change slowly such that $\dot{\boldsymbol{p}} \approx \mathbf{0}$. This yields additional zero-rows in $\boldsymbol{A}$ and zeroes in $\boldsymbol{C}$.

4. Exact Linearization

EL utilizes LIE-derivatives to transform the nonlinear state equation into a linear one. They are defined as

$$L_{\boldsymbol{f}}h(\boldsymbol{x}) \coloneqq \frac{\partial h(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) = \big(\boldsymbol{\nabla} h(\boldsymbol{x})\big)^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})\ . \tag{14}$$

Here, the nonlinear state equations are $\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u})$ and $y = h(\boldsymbol{x})$. In case of input affinity, the equation $\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u})$ can be rewritten as $\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{a}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{b}(\boldsymbol{x})u$. The LIE-derivatives are applied to $\boldsymbol{a}(\boldsymbol{x})$, $\boldsymbol{b}(\boldsymbol{x})$ and $h(\boldsymbol{x})$. For index $= 0, \dots, \delta$, where δ is the relative degree of the system, follows

$$y^{(\mathrm{i})} = L_{\boldsymbol{a}}^{\mathrm{i}}h(\boldsymbol{x}) + \frac{\partial L_{\boldsymbol{a}}^{\mathrm{i}-1}h(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}\boldsymbol{b}(\boldsymbol{x}) \cdot u \tag{15}$$

where for all $i = 0, \dots, \delta - 2$ holds

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$L_{\boldsymbol{b}} L_{\boldsymbol{a}}^{\mathrm{i}} h(\boldsymbol{x}) = \frac{\partial L_{\boldsymbol{a}}^{\mathrm{i}} h(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}} \boldsymbol{b}(\boldsymbol{x}) = 0 \tag{16}$$

The resulting transformation to the new state vector $\boldsymbol{x}^*$ is a diffeomorphism [Adam14]. Using the back-substitution $\boldsymbol{x}^* = \boldsymbol{t}(\boldsymbol{x})$ results in the nonlinear ACKERMANN-law for the given system of the turbocharger actuator with a relative degree $\delta = 3$

$$u = \frac{a_0 y_{\mathrm{sp}}}{L_{\boldsymbol{b}} L_{\boldsymbol{a}}^2 h(\boldsymbol{x})} - \frac{L_{\boldsymbol{a}}^3 h(\boldsymbol{x}) + a_2 L_{\boldsymbol{a}}^2 h(\boldsymbol{x}) + a_1 L_{\boldsymbol{a}}^1 h(\boldsymbol{x}) + a_0 L_{\boldsymbol{a}}^0 h(\boldsymbol{x})}{L_{\boldsymbol{b}} L_{\boldsymbol{a}}^2 h(\boldsymbol{x})} = v(\boldsymbol{x}) - r(\boldsymbol{x}) \tag{17}$$

with the setpoint y_{sp} and $a_2 = \lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2$, $a_1 = \lambda_0\lambda_1 + \lambda_0\lambda_2 + \lambda_1\lambda_2$ and $a_0 = \lambda_0\lambda_1\lambda_2$. The poles λ_{i} define the closed-loop dynamics and can be freely chosen. Thus, $r(\boldsymbol{x})$ can be interpreted as controller part and $v(\boldsymbol{x})$ pre-filter part. This becomes clear by the control scheme depicted in Fig. 5, which is completed by the gas force estimation and compensation (see section 2.3). Therefore, the EKF only has to estimate the residual disturbances.

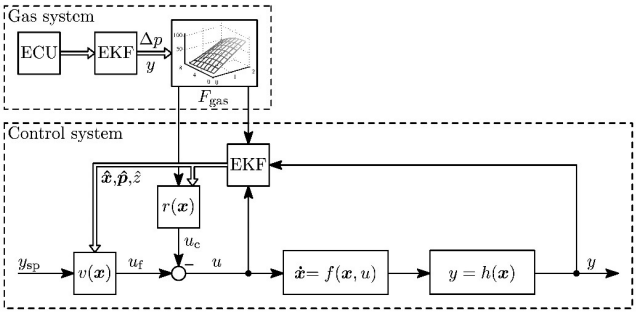


Fig. 5: Resulting scheme of EL with gas force compensation

5. Benchmark control strategies

EL is compared to a two degrees-of-freedom (DOF) control structure and to a series gain-scheduled PID-controller. The Two-DOF controller is a combination of the approaches published in [Feld10, Feld15] and [KFKE12, Kopf14]. It allows separate design of reference behaviour as well as disturbance behaviour. The nonlinearities are neglected with the exception of the nonlinear kinematic transmission. The corresponding function $\varphi = g^{-1}(y)$ transfers the system to a linear representation with respect to the coordinate φ. Due to this nonlinear transformation, the underlying control task becomes mainly linear and relatively simple. The remaining nonlinearities are taken into account by a disturbance estimate $\hat{z}$. This estimate as well as the state estimate $\hat{\boldsymbol{x}} := [\hat{\varphi} \quad \dot{\hat{\varphi}} \quad \ddot{\hat{\varphi}}]^{\mathrm{T}}$ is generated by a linear LUENBERGER disturbance observer.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

The reference behaviour is defined by a flatness based trajectory generator. It consists of a state variable filter state which takes into account the motor voltage limitation. The resulting reference state vector $\boldsymbol{x}_\mathrm{r} \coloneqq [\varphi_\mathrm{r} \quad \dot{\varphi}_\mathrm{r} \quad \ddot{\varphi}_\mathrm{r}]^\mathrm{T}$ is used to calculate the feed-forward manipulating variable u_f by an inversion of the linear plant model (for details see [Feld15, KFKE12]). An optimisation, described in [KFKE12, Kopf14], leads to a controller design which guarantees robustness with respect to the expected parameter variations.

The controller is a conventional gain-scheduled PID-controller. Its parameters are adapted with respect to the desired and actual states, e. g. value and step size of desired, desired and actual speed. Additionally, it comprises different complementary functions, like friction compensation. These complementary functions are also parameterized depending on desired and actual states. Thus, the calibration of the controller is very elaborate und time-consuming. As a further disadvantage, even slight actuator changes make a costly re-parameterization necessary. The calibration of the controller used comparison is exactly the same as in series.

6. Experimental evaluation

The presented control strategies are firstly validated by tests in a climatic chamber to achieve qualitative as well as quantitative comparability. The adjusted temperatures cover the whole range of operation (−40°C to +160°C). After a thermal conditioning time, the actuator temperature is equal to the climatic chamber temperature. Due to the known temperature dependency, the estimates of $R_\mathrm{m}(\vartheta)$ and $K_\mathrm{m}(\vartheta)$ can be utilized to estimate the temperature ϑ.

Fig. 6 presents exemplary step responses of the real actuator using the series controller (left), the Two-DOF controller (middle) and the proposed EL controller.

The step responses of the series controller vastly vary over the actuator temperature. For low temperatures high friction leads to delayed reaching of the setpoint, whereas for high temperatures the low system damping induces large overshoots. These are clearly smaller for the Two-DOF controller. The remaining difference between the step responses owe to the time variant system characteristics, which are not captured by this controller. Particularly in comparison to EL, whose step responses are almost identical, this effect becomes apparent. Nevertheless, the activity of the actuating value of EL is clearly reduced compared to the Two-DOF controller.

Fig. 7 depicts a quantitative comparison of the settling time and overshoot for step responses of different heights. The different heights capture the effects of the position dependent sys-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

tem gain and, thus, one of the major nonlinearities. Furthermore, each value is averaged over all tested temperatures to obtain information about robust performance.

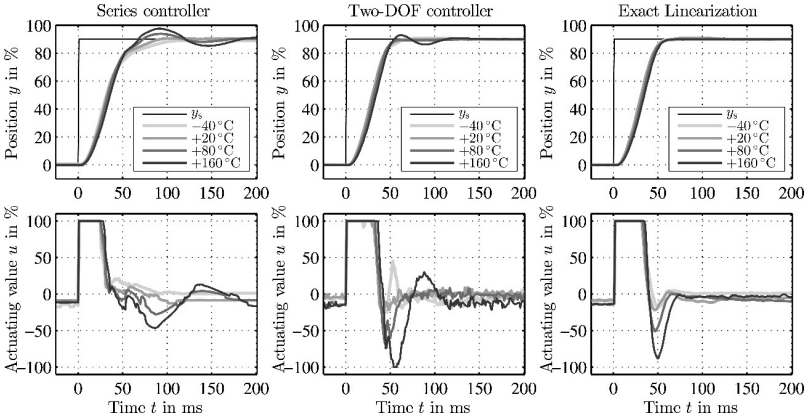


Fig. 6: Step responses for varies actuator temperatures

In the left half of

Fig. 7 EL shows the mean settling time. Two-DOF performs merely slower whereas the series controller requires the longest settling time. In the right half EL outperforms in almost every case. Surprisingly, Two-DOF shows even the largest overshoots. However, the relatively good result of the series controller is based on the weak control gain, which also led to the long settling times. Overall, EL outperforms both the Two-DOF controller and the series controller in almost every case. Additionally it shows minor steady-state variance of the actuating value as shown in [LuGr15].

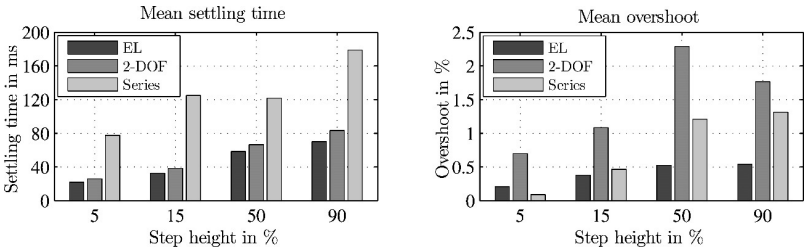


Fig. 7: Comparison of settling time and overshoot

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

The second validation of the suggested control structure is conducted under real driving conditions using a rapid control prototyping hardware. One of the most critical driving situations in sense of gas forces and required closed-loop performance is a full throttle acceleration beginning at low engine speed as shown in

Fig.8 without (left) and with gas force compensation (right). In the beginning, the wastegate is closed ($y = 100\%$). As soon as the turbocharger reaches its admissible speed, the wastegate opens until the next gear change lasts. In this phase, the gas forces reach their maximum. As result, the estimated disturbance $\hat{z}$ without gas force compensation reaches almost 20% of actuator capacity.

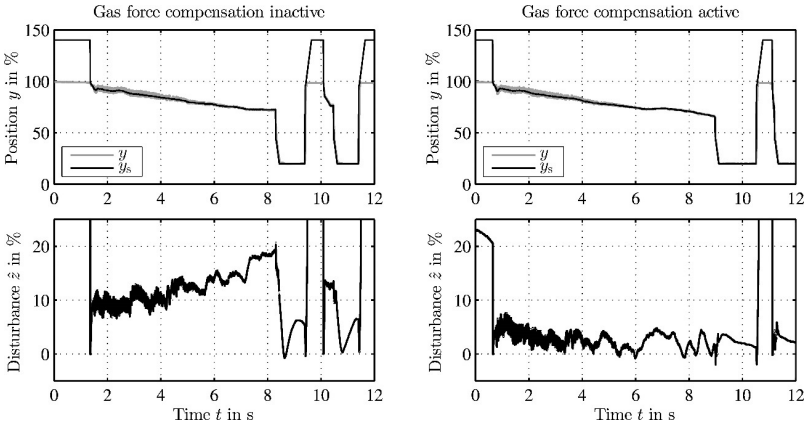


Fig.8: Effect of gas force compensation on disturbance estimation

In the right half however, the estimated disturbance remains in low percentage range when the gas force compensation is activated. Due to the better model and estimation quality the integrating part of the observer is relieved and windup is avoided. Thus, the control concept is better placed to follow the setpoint during sudden load changes, which proves the effectiveness of the compensation.

7. Conclusions

In this paper a new control strategy is presented, which consists of a nonlinear, time-varying control law based on Exact Linearization in combination with a physically motivated model based disturbance compensation and online parameter adaption by a nonlinear joint-estimator. For an exemplary automotive application, the concept proves its ability to realize

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

almost time-invariant linear input-output characteristics to a highly nonlinear and time-variant control path. Both, the controller as well as the observer are using a straight forward grey-box-model, which is derived in a highly automated identification process. The results show superior performance and robustness compared to the series controller as well as a Two-DOF controller, which is here regarded as state of research. Due to its generic base, the authors strongly believe, that this approach is suitable for a variety nonlinear mechatronic systems with highest demands to closed-loop robust performance.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the support for this work provided by European Regional Development Fund (ERDF).

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literatur

[Adam14] ADAMY, JÜRGEN: *Nichtlineare Systeme und Regelungen*. Berlin; Heidelberg : Springer, 2014 — ISBN 978-3-642-45012-9

[ArDD94] ARMSTRONG-HÉLOUVRY, BRIAN ; DUPONT, PIERRE ; DE WIT, CARLOS CANUDAS: A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction. In: *Automatica* Bd. 30 (1994), Nr. 7, S. 1083–1138

[Brem88] BREMER, HARTMUT: *Dynamik und Regelung mechanischer Systeme*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 1988 — ISBN 978-3-519-02369-2

[Feld10] FELDT, MATTHIAS: Flatness-Based Control and Online Trajectory Generation for Electrical Actuators in Combustion Engines. In: *Advances in Automotive Control*. München, 2010, S. 146–151

[Feld15] FELDT, MATTHIAS: *Entwurfsverfahren zur systematischen Auslegung von Lageregelkreisen für elektromechanische Aktuatoren im Gassystem von Verbrennungsmotoren*, *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik*. Als Ms. gedr. Aufl. Düsseldorf : VDI-Verl, 2015 — ISBN 978-3-18-524108-6

[HoHR08] HORN, MARTIN ; HOFER, ANTON ; REICHHARTINGER, MARKUS: Control of an electronic throttle valve based on concepts of sliding-mode control. In: *Control Applications*. San Antonio : IEEE, 2008 — ISBN 978-1-4244-2222-7, S. 251–255

[KaBF05] KARNIK, A.Y. ; BUCKLAND, J.H. ; FREUDENBERG, J.S.: Electronic throttle and wastegate control for turbocharged gasoline engines. In: *American Control Conference (ACC)*. Portland : IEEE, 2005 — ISBN 0-7803-9098-9, S. 4434–4439

[KFKE12] KOPF, STEFAN ; FELDT, MATTHIAS ; KONIGORSKI, ULRICH ; EICHHORN, MIKE: A Uniform Concept for the Reliable Calibration of High Performance Position Controllers for Various Intake System Actuators. In: *Automotive Powertrain Control Systems*. Renningen : Expert, 2012 — ISBN 3-8169-3155-3

[Kopf14] KOPF, STEFAN: *Modellbasierte Lageregelung mechatronischer Aktuatoren im Luftpad von Verbrennungsmotoren*. Berlin, epubli, 2014

[LuGr14] LUCK, BENNET ; GROTJAHN, MARTIN: Simplified estimation and compensation of gas forces in exhaust gas lines. In: *10. Symposium Steuerungssysteme für automobile Antriebe*. Berlin, 2014

[LuGr15] LUCK, BENNET ; GROTJAHN, MARTIN: Model-based Control of Electrical Actuators with Nonlinear Dynamics. In: *Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik (IKMT)*. Köln : VDE, 2015

[MeLB12] MEHMOOD, A. ; LAGHROUCHE, S. ; BAGDOURI, M. EL: Position tracking of the VGT single acting pneumatic actuator with 2nd order SMC and backstepping control techniques. In: *Variable Structure Systems (VSS)*. Mumbai : IEEE, 2012 — ISBN 978-1-4577-2067-3, S. 94–99

[Merw04] VAN DER MERWE, RUDOLPH: *Sigma-Point Kalman Filters for Probabilistic Inference in Dynamic State-Space Models*. Stellenbosch, Oregon Health & Science University, 2004

[PfSc14] PFEIFFER, FRIEDRICH ; SCHINDLER, THORSTEN: *Einführung in die Dynamik*. Berlin; Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014 — ISBN 978-3-642-41045-1

[WeBi95] WELCH, GREG ; BISHOP, GARY: *An Introduction to the Kalman Filter* : University of North Carolina at Chapel Hill, 1995

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Modellbasierte Regelung von Erdgas-Diesel Dual-Fuel Motoren

Model-based Control of CNG-Diesel Dual-Fuel Engines

Dipl.-Ing. **Dennis Ritter**, Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Dirk Abel**,
Dr.-Ing. **Thivaharan Albin**,
Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen University, Aachen;
Dipl.-Ing. **Metin Korkmaz**, Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Heinz Pitsch**,
Institut für Technische Verbrennung, RWTH Aachen University, Aachen

Kurzfassung

Im vorliegenden Beitrag wird ein modellbasiertes Regelungskonzept für den Erdgas-Diesel Dual-Fuel Motor vorgestellt. Kernstück des Gesamtkonzeptes ist der Verbrennungsregler, welcher in der Lage ist, die Verbrennungsschwerpunktlage bei flexibler Vorgabe der Diesel-Substitutionsrate sowohl im konventionellen Diesel Dual-Fuel (DDF) als auch im kinetisch kontrollierten Verbrennungsregime (Reactivity Controlled Compression Ignition, RCCI) unter stationären und lasttransienten Bedingungen einzuregeln. Letzteres zeichnet sich durch eine frühere Lage der Dieseleinspritzung aus, wodurch ein insgesamt höherer Homogenisierungsgrad des Kraftstoff-Luft-Gemisches erreicht wird. Bisherige Regelungsansätze konzentrieren sich auf die Stabilisierung um eine vorgegebene Verbrennungsschwerpunktlage bei maximaler Diesel-Substitutionsrate bzw. minimaler Dieselmasse. Dieser Übergangsbereich zwischen konventionellem DDF und RCCI Betriebsbereich kann mit dem dargelegten Ansatz ebenfalls eingeregelt werden. Zusätzlich können aber auch Betriebspunkte bei gleicher Verbrennungsschwerpunktlage und höheren Dieselmassen im RCCI Regime eingestellt werden. Diese können sowohl hinsichtlich Wirkungsgrad als auch Schadstoffemissionen Vorteile bieten. Durch die Verwendung eines modellbasierten Ansatzes, bei welchem ein datenbasiertes Modell des Dual-Fuel Prozesses innerhalb einer optimierungsbasierten Regelung verwendet wird, kann außerdem der Applikationsaufwand für die Reglerparametrierung geringgehalten werden.

1. Einleitung

Fast ein Fünftel der globalen CO_2-Emissionen werden heute durch den Straßenverkehrssektor verursacht. Langfristig wird sich darüber hinaus bis zum Jahr 2035 der Bedarf an stra-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

ßengebundenen Verkehrsmitteln noch nahezu verdoppeln. Der Verbrennungsmotor stellt noch immer die primäre Antriebsquelle dar, sei es in Form von rein verbrennungsmotorischen oder auch hybriden Antriebskonzepten. Ein vielversprechendes Konzept zur Reduktion der verbrennungsmotorischen CO_2-Emissionen stellt der Erdgas-Diesel Dual-Fuel Motor dar. Bei diesem wird Erdgas als Primär- und Diesel als Sekundärkraftstoff in einem kompressionsgezündeten Motor verwendet. Während das Erdgas ins Saugrohr eingeblasen und als nahezu homogenes Gemisch mit Luft in den Zylinder gesaugt wird, erfolgt die Dieseleinspritzung direkt in den Brennraum gegen Ende des Kompressionstaktes. Sie fungiert hierbei als Zündstrahl für das vorgemischte Erdgas-Luft-Gemisch. Im Vergleich zu einer konventionellen Funkenzündung, bei welcher nur der Zündzeitpunkt variiert werden kann, ergeben sich bei einem Zündstrahl mehr Freiheitsgrade. Die Verbrennung kann hierbei sowohl durch Variation der Dieselmasse als auch des Einspritzzeitpunktes gezielt beeinflusst werden.

Die Verwendung von Erdgas als Primärkraftstoff bietet eine Reihe von Vorteilen. Die energiespezifischen CO_2-Emission von Erdgas sind um circa ein Viertel geringer als die von Benzin oder Diesel, abhängig von der Qualität des Erdgases. Methan als Hauptbestandteil von Erdgas weist eine hohe Klopffestigkeit auf. Dadurch wird die Verwendung hoher Verdichtungsverhältnisse, vergleichbar mit denen von Dieselmotoren, ermöglicht und somit der thermische Wirkungsgrad gesteigert [1].

Der Erdgas-Diesel Dual-Fuel Motor bietet hierbei diese hohen Potentiale zur Reduktion von CO_2-Emissionen und kann gleichzeitig auf Abgasnachbehandlungssysteme für Stickoxide im mageren Betrieb, aufgrund der geringen Rohemissionen, vollständig verzichten.

Den genannten Vorteilen des Erdgas-Diesel Dual-Fuel Motors steht dessen Komplexität bei der Beherrschung des Brennverfahrens selbst gegenüber. Zur Gewährleistung eines stabilen und sicheren Betriebs unter stationären und vor allem auch transienten Bedingungen, bei gleichzeitiger Handhabung der großen Anzahl an Freiheitsgraden die das System bietet, nimmt die Regelung eine Schlüsselrolle ein.

2. Regelungskonzept

Aus regelungstechnischer Sicht kann der Dual-Fuel Motor als ein stark gekoppeltes Mehrgrößensystem aufgefasst werden. Besonderheiten beim Erdgas-Diesel Dual-Fuel Motor, im Vergleich zu konventionellen otto- und dieselmotorischen Konzepten, bilden die stark unterschiedlichen Zeitkonstanten des Gas- und des Diesel-Kraftstoffpfades, denen vor allem im

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

lasttransienten Betrieb Rechnung getragen werden muss, und des Weiteren die starken Nichtlinearitäten im statischen Übertragungsverhalten, welche den Ablauf der Verbrennung selbst betreffen.

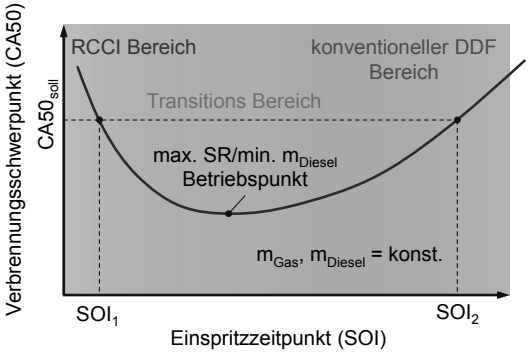


Bild 1: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Verbrennungsregime im Dual-Fuel Betrieb; Übergang zwischen konventionellem Diesel Dual-Fuel (DDF) und kinetisch kontrolliertem kompressionsgezündetem (Reactivity Controlled Compression Ignition, RCCI) Bereich durch alleinige Variation des Einspritzzeitpunktes (SOI) der Dieseleinspritzung bei konstanter Diesel- und Gasmasse

Um dies zu verdeutlichen, zeigt Bild 1 schematisch die Abhängigkeit der Verbrennungsschwerpunktlage CA50 vom Einspritzzeitpunkt der Dieseleinspritzung SOI bei ansonsten konstanten Betriebsparametern (Gas-, Dieselmasse und globales Luftverhältnis). Charakteristisch für den Dual-Fuel Betrieb ist der nichtmonotone Verlauf, welcher somit eine Vorzeichenumkehr des statischen Übertragungsbeiwertes von SOI auf CA50 zur Folge hat [2-5]. Die verschiedenen Verbrennungsregime, welche bei einer Verstellung des Einspritzzeitpunktes durchlaufen werden, sind hierbei zum einen der konventionelle Diesel Dual-Fuel (DDF) Bereich bei späten und der kinetisch kontrollierte (RCCI) Bereich bei frühen Einspritzlagen [3,4]. Im RCCI Bereich erfolgt die Dieseleinspritzung noch bevor sich im Brennraum in Folge der Kompression Zündbedingungen eingestellt haben im Gegensatz zum konventionellen DDF Bereich, wodurch mehr Zeit für die Gemischaufbereitung des Dieselfreistrahls zur Verfügung steht und ein entsprechend höherer Homogenisierungsgrad erreicht werden kann. Die Vorzeichenumkehr der statischen Sensitivität $\frac{\partial CA50}{\partial SOI}$ wird hierbei durch den Einfluss des lokalen Luftverhältnisses auf den Zündverzug hervorgerufen [3,4]. Im Übergangsbereich zwi-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

schen dem DDF und RCCI Betriebsbereichen liegt der Einspritzzeitpunkt, welcher zur frühestmöglichen Verbrennungsschwerpunktlage führt.

Neben dem Einspritzzeitpunkt hat auch die eingespritzte Dieselmasse einen starken Einfluss auf die Verbrennungsschwerpunktlage. Dieser ist jedoch im Gegensatz zum Einspritzzeitpunkt streng monoton, d.h. durch Erhöhung der Dieselmasse bei ansonsten konstanten Betriebsparametern verschiebt sich die Verbrennungsschwerpunktlage immer in Richtung Früh ($\frac{\partial CA50}{\partial m_{Diesel}} < 0$). Bild 2 zeigt diese zusätzliche Abhängigkeit Anhand von Messdaten und einem identifizierten datenbasierten Prozessmodell, welches hier den Einfluss von Einspritzzeitpunkt und Dieselmasse auf Verbrennungsschwerpunktlage sowohl qualitative als auch quantitativ sehr gut reproduzieren kann.

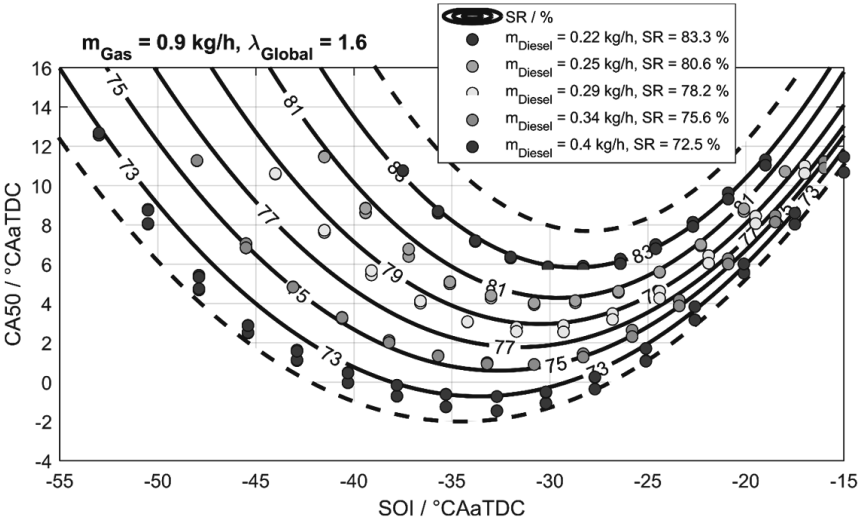


Bild 2: Validierung des datenbasierten Dual-Fuel Prozessmodells; Vergleich zwischen gemessener (Datenpunkte) und modellierter (Konturlinien) Verbrennungsschwerpunktlage (CA50) in Abhängigkeit des Einspritzzeitpunktes (SOI) und der eingespritzten Dieselmasse (m_{Diesel}) bzw. Diesel-Substitutionsrate (SR) bei ansonsten konstanten Betriebsparametern

In Bild 3 ist der strukturelle Aufbau des gesamthaften Dual-Fuel Regelungskonzeptes dargestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

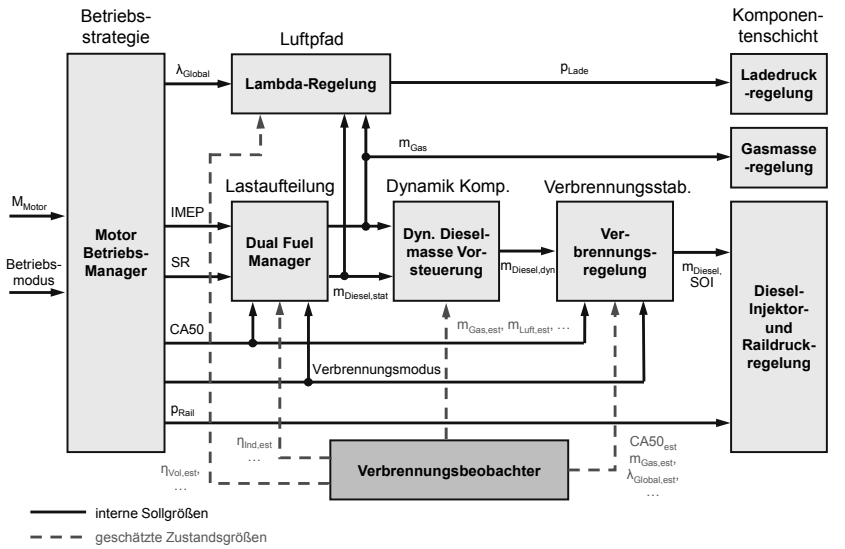


Bild 3: Schematische Darstellung der Dual-Fuel Gesamtfunktionsarchitektur

Die Eingangsschicht bildet die Betriebsstrategie in Form des Motorbetriebsmanagers, welcher auf Basis des geforderten Motormoments und des Betriebsmodus (reiner Diesel-Betrieb bzw. Dual-Fuel-Betrieb) Sollwerte für die, den Betriebspunkt des Motors definierenden Parameter, indizierter Mitteldruck (IMEP), Diesel-Substitutionsrate (SR), Verbrennungsschwerpunktlage inkl. Verbrennungsmodus (DDF oder RCCI), globales Luftverhältnis (λ_{Global}) und Raildruck (p_{Rail}), bestimmt. Die Bestimmung der optimalen Betriebspunktparameter, beispielsweise mit Hinblick auf maximalen Wirkungsgrad bzw. minimalen Betriebskosten unter Berücksichtigung von Beschränkungen für die Schadstoffemissionen, ist nicht Teil dieses Beitrags.

Stattdessen soll hier kurz skizziert werden, wie in den nachfolgenden Funktionsblöcken, auf Basis der aus der Betriebsstrategie bereitgestellten Soll-Betriebsparameter, die Sollwerte für die unterlagerten Regelkreise der Komponentenschicht berechnet werden. Diese umfassen den Sollladedruck für die Ladedruckregelung (p_{Lade}), die Sollgasmasse für die Gasmasseregelung (m_{Gas}) und die geforderte Dieselmasse (m_{Diesel}) und den Einspritzzeitpunkt (SOI) für die Injektorregelung. Innerhalb der Komponentenschicht erfolgt schließlich die eigentliche Berechnung der Stellgrößen für die Aktoren.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In dieser mittleren Funktionsschicht wird zunächst im Dual-Fuel Manager die energetische Lastaufteilung auf die beiden Kraftstoffpfade vorgenommen. D.h. ausgehend von der geforderten Last (IMEP) und Substitutionsrate (SR) werden die Sollkraftstoffmassenströme m_{Gas} und $m_{Diesel,stat}$ berechnet. Als Prozessfeedback geht in diese Berechnung unter anderem der geschätzte indizierte Wirkungsgrad ($\eta_{Ind,est}$) ein, welcher vom zentralen Verbrennungsbeobachter bereitgestellt wird. Die beiden Kraftstoffmassenströme werden zum einen an die Lambda-Regelung weitergereicht, welche auf Basis der geschätzten aktuellen volumetrischen Effizienz ($\eta_{Vol,est}$) die benötigte Sollluftmasse bzw. den daraus resultierenden Sollladedruck (p_{Lade}) bestimmt. Zum anderen dienen beide Kraftstoffmassenströme als Eingänge für die dynamische Dieselmasse Vorsteuerung. Diese hat die Aufgabe die langsame Dynamik des Gaspfades, auf welche später noch eingegangen wird, über den schnellen Dieselpfad im lasttransienten Betrieb zu kompensieren. Um dies zu realisieren, wird im Verbrennungsbeobachter über ein dynamisches Modell des Gaspfades die tatsächliche Gasmasse im Brennraum geschätzt. Des Weiteren werden in diesem Funktionsblock noch Beschränkungen sowohl für die Substitutionsrate als auch das globale Luftverhältnis, basierend auf der geschätzten Gas- und Luftmasse im Brennraum, berücksichtigt, indem der vorher berechnete dynamische Sollwert für die Dieselmasse ($m_{Diesel,dyn}$) entsprechend limitiert wird.

Das Kernelement bildet im jetzt folgenden Schritt die Verbrennungsregelung. Diese hat zwei Aufgaben. Zum einen die Stabilisierung der Verbrennungsschwerpunktlage um den vorgegebenen Sollwert (CA50) unter zusätzlicher Vorgabe des gewünschten Verbrennungsmodus (primäres Regelziel). Die Stabilisierung der Verbrennungsschwerpunktlage garantiert hierbei eine jederzeit stabile Verbrennung (Verhindern von Verbrennungsanomalien wie Fehlzündung, Klopfen, etc.). Um dies zu erreichen, muss das in Bild 1 und 2 dargestellte nichtlineare (nichtmonotone) Prozessverhalten berücksichtigt werden. Zum anderen soll der Prozess stationär auf die geforderte Substitutionsrate (SR) geführt werden und dynamisch die geforderte Lastanforderung (IMEP) erfüllen (sekundäres Regelziel). Das sekundäre Regelziel wird hierbei erfüllt, sobald der Prozess auf den dynamischen Sollwert für die Dieselmasse ($m_{Diesel,dyn}$) geführt wird. Zur Erfüllung beider Regelziele stehen dem Verbrennungsregler die Stellgrößen des Dieselpfades, d.h. die Dieselmasse (m_{Diesel}) und der Einspritzzeitpunkt (SOI) zur Verfügung. Die Verwendung beider Freiheitsgrade als Stellgrößen zur Stabilisierung der Verbrennungsschwerpunktlage ist hier notwendig, um die Steuerbarkeit des Prozesses in jedem Betriebspunkt zu gewährleisten. Über die alleinige Variation des Einspritzzeitpunktes ist dies nicht gewährleistet, da die Sensitivität $\frac{\partial CA50}{\partial SOI}$ im Transitionsbereich, d.h. im Betrieb bei maximaler Substitutionsrate bzw. minimaler Dieselmasse (siehe Bild 1), einen Nulldurchgang

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

aufweist. Methodisch realisiert wird der Verbrennungsregler mittels eines optimierungsbasierten Ansatzes (lineare modellprädiktive Regelung mit Einschrittprädiktion) unter Verwendung eines datenbasierten Prozessmodells ($CA50 = f(SOI, m_{Diesel}, m_{Gas}, \lambda_{Global})$), welches sukzessive in jedem Abtastschritt linearisiert wird. Um den Einfluss von Störgrößen und Modellabweichungen zu kompensieren und somit eine bleibende Regelabweichung im stationären Betrieb zu vermeiden, wird ein zusätzlicher Störzustand (konstante Ausgangsstörung) geschätzt, welcher entsprechend dem affinen Prozessmodell hinzuaddiert wird.

Im Gegensatz zu dem in [4] erläuterten Regelungsansatz, können mit dem dargestellten Ansatz die Verbrennungsschwerpunktlage und die Diesel Substitutionsrate unabhängig voneinander eingeregelt werden, d.h. es können beliebige Betriebspunkte im DDF und RCCI Bereich eingestellt werden und nicht nur solche bei maximaler Diesel Substitutionsrate bzw. minimaler Dieselmasse (Extremwertregelung).

3. Versuchsträger

Die experimentellen Untersuchungen inklusive der Validierung des gesamthaften Regelungskonzeptes erfolgten an einem Einzylinderprüfstand am Institut für Technische Verbrennung an der RWTH Aachen University. Als Basis für den Versuchsträger dient ein modifizierter 4-Zylinder PKW Dieselmotor, welcher für den Betrieb als Einzylindermotor umgerüstet wurde. Für den Dual-Fuel-Betrieb wurde außerdem ein neuer Kolben mit angepasster Muldengeometrie verwendet und das Verdichtungsverhältnis leicht reduziert. Das Dieseleinspritzsystem wurde nicht verändert. Die Gaseinblasung erfolgt zentral im Luftpfad kurz hinter der Verdichtereinheit. Dadurch ergibt sich aus regelungstechnischer Sicht eine weitere Herausforderung für den Lasttransienten Betrieb, da das System eine signifikante Totzeit durch die Transportlaufzeit des Gases von der Einblasung bis zum Brennraum aufweist. In Abhängigkeit des Betriebspunktes kann diese bis zu 0.8 s betragen, wie später in den Validierungsergebnissen noch zu sehen sein wird. Weitere Details zum Prüfstandsaufbau können [6] entnommen werden.

4. Ergebnisse und Validierung

Bild 4 zeigt beispielhaft ein Validierungsergebnis des gesamthaften Regelungskonzeptes unter lasttransienten Bedingungen. Die Regelung soll hier einem zeitvarianten Sollwertprofil für IMEP folgen. Die Motordrehzahl wird konstant auf n = 2000 1/min gehalten.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

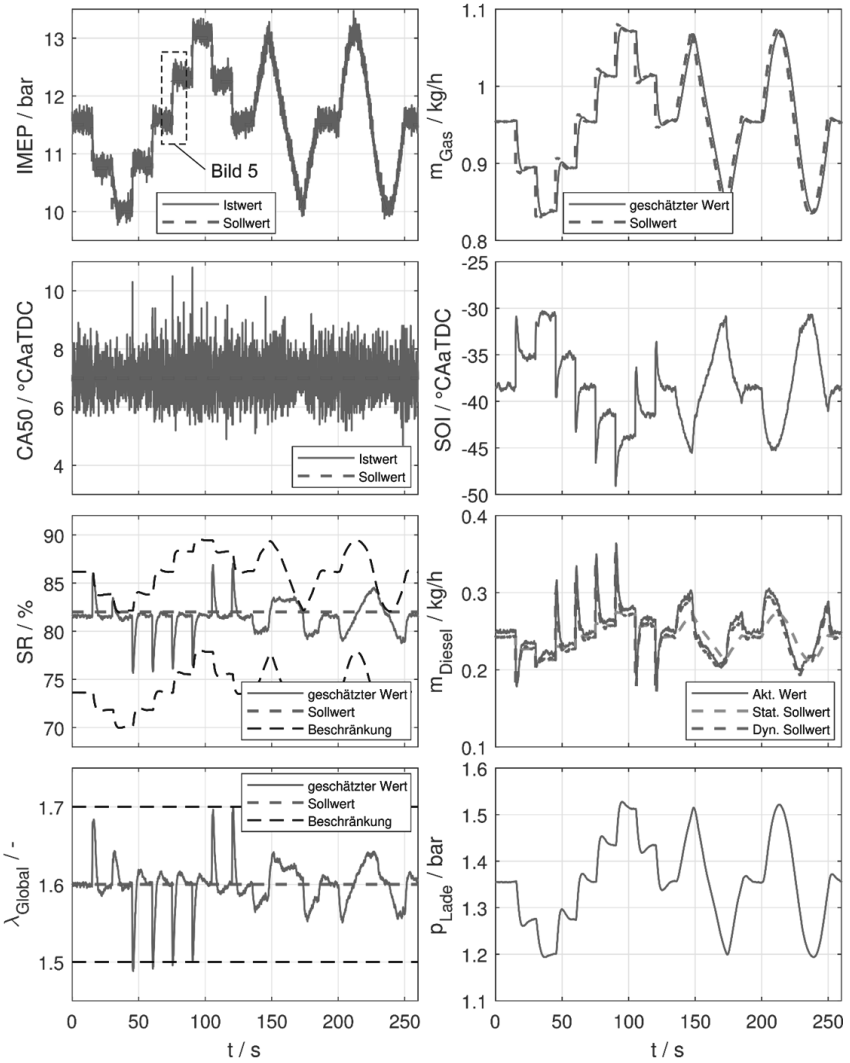


Bild 4: Lasttransientes Regelergebnis bei konstanter Motordrehzahl von n = 2000 1/min; Folgeregelung mit zeitvariantem Solllastprofil (IMEP); konstante Sollwertvorgabe für CA50, SR und λ_{Global}; Stabilisierung von CA50 im RCCI Verbrennungsmodus; Einhaltung von Beschränkungen für SR und λ_{Global}

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

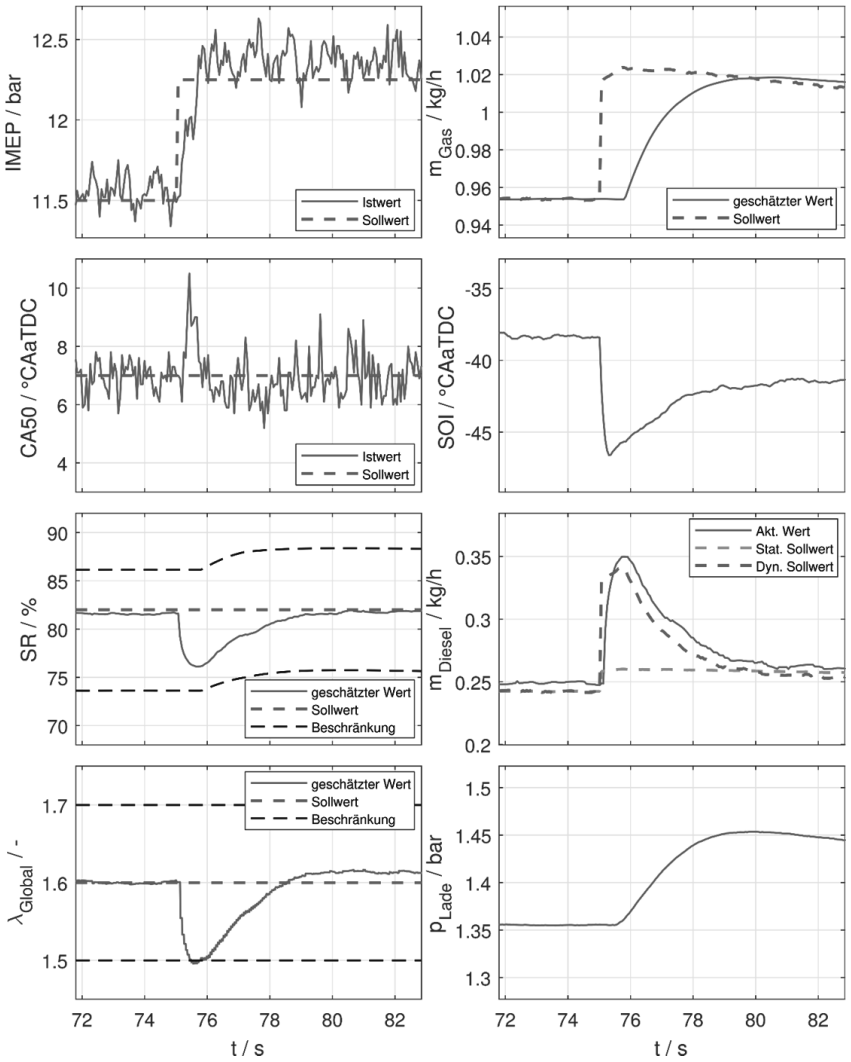


Bild 5: Ausschnitt aus dem in Bild 4 dargestellten lasttransienten Regelergebnis

CA50, SR und λ_{Global} sollen auf jeweils konstante Sollwerte eingeregelt werden. Der Verbrennungsschwerpunkt soll im RCCI Verbrennungsmodus, d.h. bei früher Lage der Dieseleinspritzung, stabilisiert werden. Zusätzlich sollen noch Beschränkungen für SR und λ_{Global} ein-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

gehalten werden, wobei die Beschränkungen für die Substitutionsrate von der Last bzw. Gasmasse abhängen. Ein genereller Trend ist, das bei fester Schwerpunktlage, die maximal erreichbare Substitutionsrate mit der Last steigt.

Die hier gewählten Sollwerte stellen keine optimalen Betriebsparameter für den jeweiligen Lastbereich dar, es soll vielmehr die Leistungsfähigkeit des Regelungskonzeptes nachgewiesen werden, in dem alle Regelgrößen (Betriebsparameter des Prozesses, Plots in der linken Spalte) unabhängig voneinander sowohl stationär als auch transient (ohne bleibende Regelabweichung) eingeregelt und auch zusätzlich die vorgegebenen Ausgangsbeschränkungen für SR und λ_{Global} eingehalten werden.

Um die Funktionsweise der dynamischen Kompensation des langsamen Gaspfades über den schnellen Dieselpfad besser zu illustrieren, zeigt Bild 5 ausschnittsweise den in Bild 4 markierten Lastsprung. Bei der Darstellung der Gasmassenströme lässt sich Anhand des Vergleichs der Sprungantworten der geschätzten Gasmasse im Brennraum mit der geforderten Sollgasmasse, welche aus der Lastaufteilung des Dual-Fuel Managers resultiert, gut die charakteristische PT_1T_t Dynamik des Gaspfades, welche sich aus der Dynamik des Gasmassenflussreglers und dem Transportverzug von der zentralen Einblasungsstelle bis zum Brennraum zusammensetzt. Im vorliegenden Fall beträgt alleine die Totzeit knapp 0.8 s. Bei einer Motordrehzahl von 2000 1/min entspricht dies etwa 13 Zyklen. Betrachtet man nun die Dieselmassenströme, sieht man, wie der statische Sollwert $m_{Diesel,stat}$ entsprechend der geschätzten Gasmasse im Brennraum angepasst wird ($m_{Diesel,dyn}$), um die Lücke zwischen m_{Gas} und $m_{Gas,est}$ zu „füllen“ und somit trotzdem der sprungförmigen Sollwertänderung von IMEP folgen zu können. Gleichzeitig wird der dynamische Sollwert $m_{Diesel,dyn}$ jedoch nach oben hin limitiert, um die untere Beschränkung für das Globale Luftverhältnis, aufgrund der trägen Dynamik des Luftpfades (siehe Verlauf von p_{Lade}), nicht zu unterschreiten. Der Verbrennungsregler stabilisiert dabei während der Sprungtransition die Verbrennungsschwerpunktlage um den vorgegebenen Sollwert von 7 °CAaTDC durch Anpassung von SOI und m_{Diesel} und versucht dabei möglichst dem vorgegebenen dynamischen Sollwert $m_{Diesel,dyn}$ zu folgen.

In weiteren Validierungsversuchen konnte erfolgreich gezeigt werden, dass das Regelungskonzept in dem hier dargestellten Lastbereich, den Dual-Fuel Prozess sowohl im DDF als auch im RCCI Bereich bei flexibler Vorgabe der Substitutionsrate, des Verbrennungsschwerpunktes und auch des globalen Luftverhältnisses führen kann.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Zusammenfassung

In dem vorliegenden Beitrag wurde ein modellbasiertes Regelungskonzept für Erdgas-Diesel Dual-Fuel Motoren vorgestellt. Erdgas-Diesel Dual-Fuel Motoren zeichnen sich durch hohe Potentiale zur Reduktion von CO_2-Emissionen bei gleichzeitiger drastischer Senkung der Schadstoffrohemission für Stickoxide und Ruß, im Vergleich zu konventionellen Dieselmotoren, aus. Diesen Vorteilen steht jedoch die Komplexität bei der Beherrschung des Brennverfahrens gegenüber. Aus regelungstechnische Sicht sind dies die hohe Anzahl an Freiheitsgraden, das stark nichtlineare Übertragungsverhalten und die unterschiedlichen Dynamiken der beiden Kraftstoffpfade für das vorliegende Setup mit zentraler Gaseinblasung. Das vorgeschlagene Regelungskonzept adressiert hierbei alle genannten Problemstellungen und ist in der Lage flexibel Betriebspunkte, definiert durch Last (IMEP), Verbrennungsschwerpunktlage (CA50), Diesel-Substitutionsrate (SR) und globalem Luftverhältnis (λ_{Global}), durch Variation der Gas-, und Dieselmasse, des Einspritzzeitpunktes und des Ladedrucks unter stationären und insbesondere auch (last-)transienten Bedingungen sowohl im konventionellen Diesel Dual-Fuel als auch im kinetisch kontrollierten kompressionsgezündetem Verbrennungsregime einzustellen und jederzeit eine stabile Verbrennung auch durch das zusätzliche Einhalten von Beschränkungen für das Luftverhältnis und die Substitutionsrate zu gewährleisten. Das Kernelement des Regelungskonzeptes stellt hierbei der eigentliche Verbrennungsregler dar, der auf einem optimierungsbasierten prädiktiven Regelungsansatz beruht, welcher eine sukzessive Linearisierung des nichtlinearen datenbasierten Prozessmodells nutzt. Das untersuchte Regelungskonzept wurde hierbei erfolgreich im drehzahlkonstantem Betrieb an einem Einzylinderprüfstand validiert.

6. Danksagung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungsergebnisse sind im Rahmen des vom Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundvorhabens „JB-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

X-Clean - Entwicklung eines neuen Dual-Fuel-Konzeptes für sicheren, emissionsarmen und flexiblen Binnen- und Küstenschiffsantrieb“ realisiert worden. Die Autoren danken dem BWMi für die finanzielle Förderung und alle Projektpartnern für die jederzeit sehr gute Zusammenarbeit.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Literatur:

[1] Serrana, D. u. Bertrand, L.: Exploring the Potential of Dual Fuel Diesel-CNG Combustion for Passenger Car Engine. Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress (2013)

[2] Königsson, F., Stahlhammer, P. u. Angstrom, H.-E.: Characterization and Potential of Dual Fuel Combustion in a Modern Diesel Engine. SAE Technical Paper 2011-01-2223 (2011)

[3] Walter, N. R., Wissink, M. L., DelVescovo, D. A. u. Reitz, R. D.: Natural Gas for High Load Dual-Fuel Reactivity Controlled Compression Ignition in Heavy-Duty Engines. Journal of Energy Resources Technology 137(4) (2014)

[4] Doosje, E., Willems, F. u. Beart, R.: Experimental Demonstration of RCCI in Heavy-Duty Engines using Diesel and Natural Gas. SAE Technical Paper 2014-01-1318 (2014)

[5] Ott, T., Zubriggen, F., Onder, C. u. Guzella, L.: Cylinder Individual Feedback Control of Combustion in a Dual Fuel Engine. Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control (2013)

[6] Korkmaz, M., Jochim, B., Beeckmann, J., Pitsch, H., Ritter, D. u. Abel, D.: Experimental Investigation and Analysis of Performance and Emissions Characteristics of a Single-Cylinder Compression Ignition Dual-Fuel-Engine for Model-Based Combustion Control. Proceedings of the 2017 Symposium for Combustion Control (2017)

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Autonomous Cooperative Multi-Convoy Control for Off-Road-Scenarios

Dipl.-Ing. **Benjamin C. Heinrich**, Dipl.-Inform. **Dennis Fassbender**,
Prof. Dr.-Ing. **Hans-Joachim Wuensche**,
Institute for Autonomous Systems Technology (TAS),
University of the Bundeswehr München

1 Abstract

While platooning for highway applications has been under research since the mid-eighties, the field of off-road platooning for multiple vehicles has been largely neglected. Additional challenges in this field comprise, amongst others, the lack of road markings for lane keeping and base stations for Vehicle-to-Infrastructure communication or GNSS correction signals. We propose a decentralized framework for stabilizing a multi convoy, i.e., multiple single-convoy capable vehicles, equipped with low-bandwidth radio transmitters, forming a platoon. Tests have been conducted both in simulation and with our autonomous vehicles.

2 Introduction

Since the mid-eighties several programs were launched to research the automation of multi-vehicle platoons; amongst others PATH, KONVOI and SARTRE (see [1, 2] for an overview). An international competition using Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication for a heterogeneous platoon was held in 2011, the Grand Cooperative Driving Challenge. Yet, numerous challenges remain. Amongst others they are the handling of delays, V2V communication and driving in unstructured environments.

In this paper, we tackle the multi-convoy problem in the largely neglected off-road scenario. In contrast to existing work [2, 3, 4], we have no structured environment, e.g., lane-markings for lateral guidance, at our disposal. Our case has been described as a challenge of the hardest level (apart form additional weather conditions) in [1]. Additionally, we are restricted to only low-bandwidth (19.2 kbit/s) V2V communication and challenging GNSS conditions, which sets us apart from, e.g., [5].

The stability of interconnected systems can be shown using the concept of *string stability* [6]. This is applicable to the multi convoy. However, it does not hold under the influence of delays [7]. We describe how we handle delays in the longitudinal control, both introduced by communication and due to each vehicle's dynamics, in section 3.

Keeping a multi convoy laterally stable without guiding structures or reliable GNSS has, to our knowledge, not been presented yet. We tackle this problem by facilitating each vehicle's ability to estimate its own control error and communicating it to its follower. This way, error accumulation over the course of the platoon is minimized. A short explanation is given in section 4.

[1]All authors are with the Institute for Autonomous Systems Technology (TAS), University of the Bundeswehr Munich, Germany. Contact author email: benjamin.heinrich@unibw.de

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Some short notes on the technical implementation of our V2V protocol are given in section 5. The proposed framework was tested both in simulation and with our two autonomous vehicles. We show results for the longitudinal dampening and lateral-offset correction in section 6.

3 Longitudinal

It is well known that chaining multiple stable leader-follower systems does not necessarily result in a stable multi convoy. In this section, we first propose a general structure to handle multi-convoy stabilization in a decentralized fashion. Then, we describe a simple exemplary implementation which we used for generating the results in section 6.

3.1 Proposed Framework

We assume each follower has the capability to estimate the distance to its respective leader and the leader's velocity by means of on-board sensors. Furthermore, we assume that all followers can communicate via radio communication, albeit with very limited bandwidth. Naturally, all followers have to be fully drive-by-wire enabled.

Since every follower can only react to its predecessor, it is trivial to show that control quality diminishes with growing platoon length. Communicating all estimates to all followers at a high frequency would alleviate the problem but is not possible due to bandwidth limitations. Our solution is to communicate necessary information at a lower frequency and predict the system's behavior between updates.

Let $\boldsymbol{x}$ denote the state of the whole system. For η followers, it is comprised of substates $\boldsymbol{x}_{[i]}, i \in \{1, \ldots, \eta\}$. Each $\boldsymbol{x}_{[i]}$ is observable by follower i and broadcasted to all other followers at a given time interval.

Given the full system state at time k, $\boldsymbol{x}^k$, there exists a string-stable optimal solution for the system states for at least h timesteps: $\boldsymbol{x}^k, \ldots, \boldsymbol{x}^{k+h}$. This solution is saved in a state buffer B. The control law leading to $\boldsymbol{x}^{k+1} = f(\boldsymbol{x}^k)$ is assumed known to all convoy members.

Note that f will depend on the individual capabilities of each follower. A heavier vehicle, for instance, will typically not be able to accelerate as quickly as a lighter one. Hence, f has to be built accordingly when the platoon forms.

All received and transmitted substates $\boldsymbol{x}_{[i]}^{k_i}$ are saved in a time-sorted update queue Q. Once a new substate $\boldsymbol{x}_{[j]}^{k_j}$ is received, it is placed in Q and B is updated at k_j, replacing the predicted $\boldsymbol{x}_{[j]}^{k_j}$ with the measured one. From the timepoint k_j forward, B is updated step-by-step using the known control law f until the next queued substate – which is then used to update the state accordingly. This is repeated until the newest available update in Q was evaluated h times. A graphical representation of this update-prediction cycle can be seen in Figure 1.

This means that each convoy member calculates the global solution locally and acts accordingly. Thus, all followers try to reach the global solution and error accumulation over the platoon is minimized. By using the local measurements (which are available at a higher frequency/lower

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

delay) to reach the global solution, we provide local stability as well.

Note that consistent timings are paramount for the proposed framework. Hence, all transmitted data carry timestamps – the points in time where the sensor reading leading to the transmitted estimates took place. In order to be independent of the local computer clocks, and thus the need to synchronize them, timestamps are converted to GNSS time.

3.2 Exemplary Implementation

In order to define the substate $\boldsymbol{x}_{[i]}$, let the absolute substate be $\boldsymbol{\xi}_{[i]} = \begin{bmatrix} d_i & v_i & a_i \end{bmatrix}^\mathsf{T}$ including the distance between member i and $i-1$ as well as velocity and acceleration of follower i. Furthermore, let the desired absolute substate be defined as $\boldsymbol{\xi}_{[i]\,\mathrm{des}} = \begin{bmatrix} d_{\mathrm{des},i} & v_{\mathrm{des},i} & 0 \end{bmatrix}^\mathsf{T}$, where the desired distance $d_{\mathrm{des},i} = d_{\min} + t_{\mathrm{gap}} v_i$ consists of a minimal safety distance in addition to holding a constant time gap t_{gap} between followers. The desired velocity $v_{\mathrm{des},i}$ is simply the convoy leader's velocity; the desired acceleration is zero. Using the convoy leader's velocity rather than the direct predecessor's improves the responsiveness of the platoon. The substate follows as $\boldsymbol{x}_{[i]} = \boldsymbol{\xi}_{[i]} - \boldsymbol{\xi}_{[i]\,\mathrm{des}} = \begin{bmatrix} \Delta d_\mathrm{i}^k & \Delta v_\mathrm{i}^k & a_\mathrm{i}^k \end{bmatrix}$.

A single convoy is described by

$$\Sigma_1 : \quad \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta d^{k+1} \\ \Delta v^{k+1} \\ a^{k+1} \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{x}^{\mathrm{k+1}}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -\Delta t & -\frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta d_\mathrm{i}^k \\ \Delta v_\mathrm{i}^k \\ a_\mathrm{i}^k \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{x}^{\mathrm{k}}} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{\Delta t^3}{6} \\ \frac{\Delta t^2}{2} \\ \Delta t \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \underbrace{j_\mathrm{i}^k}_{\boldsymbol{u}^{\mathrm{k}}},$$

where we discretized with a time constant of Δt and chose the jerk j as input. Chaining multiple single convoys introduces coupling terms. Considering two followers, we get

$$\Sigma_2 : \quad \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta d_1^{k+1} \\ \Delta v_1^{k+1} \\ a_1^{k+1} \\ \Delta d_2^{k+1} \\ \Delta v_2^{k+1} \\ a_2^{k+1} \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{x}^{k+1}} = \underbrace{\left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & -\Delta t & -\frac{\Delta t^2}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} & 1 & -\Delta t & -\frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right]}_{\mathbf{A}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta d_1^k \\ \Delta v_1^k \\ a_1^k \\ \Delta d_2^k \\ \Delta v_2^k \\ a_2^k \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{x}^k} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{\Delta t^3}{6} & 0 \\ \frac{\Delta t^2}{2} & 0 \\ \Delta t & 0 \\ \frac{\Delta t^3}{6} & -\frac{\Delta t^3}{6} \\ 0 & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \underbrace{\begin{bmatrix} j_1^k \\ j_2^k \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{u}^k},$$

where the coupling terms are highlighted in red. Not using the direct predecessor's state removed more coupling terms (marked in blue). The above system is easily extended to the η-follower case.

Given the linearized system, we use a linear-quadratic regulator (LQR) for determining the optimal control input $\boldsymbol{u}^k = -K\boldsymbol{x}^k$. Consequently, we found $f(\boldsymbol{x}^k) := \boldsymbol{x}^{k+1} = (A - BK)\boldsymbol{x}^k$. An LQR was chosen since it is trivially string-stable and intuitively tunable. Furthermore, it considers the input energy, which leads to more comfortable driving.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

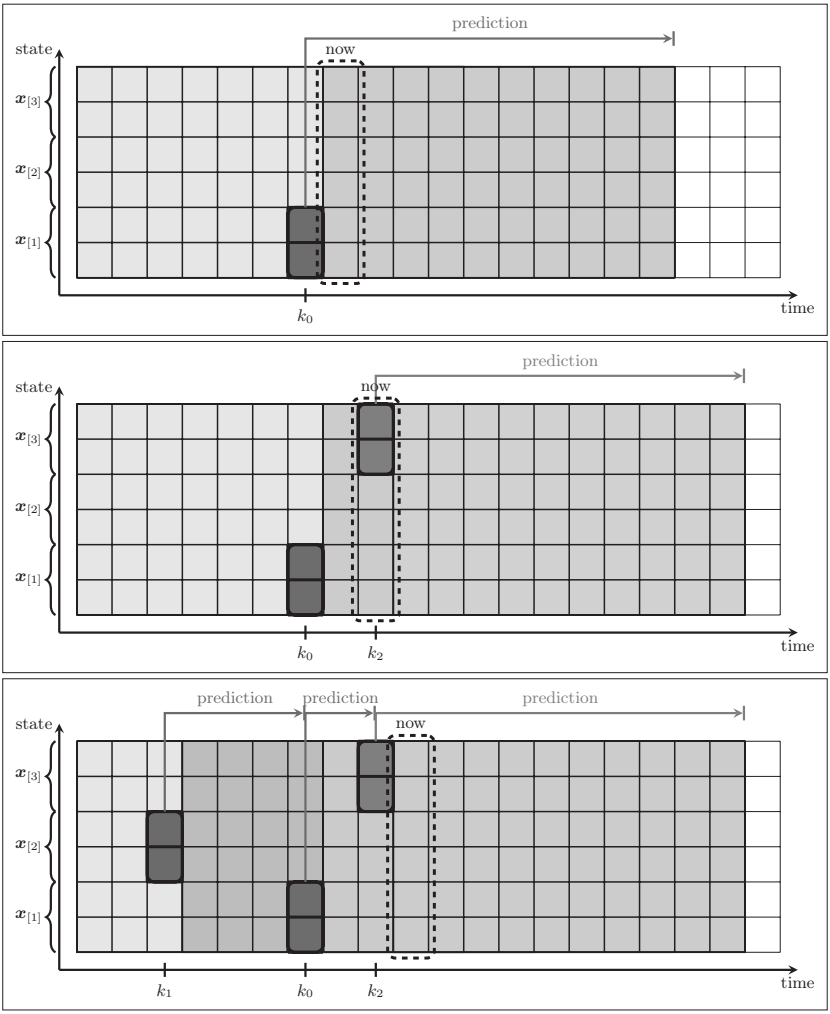


Figure 1: Depiction of the update-prediction cycle of the state buffer (here $\eta = 3$). We show three time steps where three measurements arrive, one per follower. The measurements are shown with bold borders, their respective prediction is color-coded to the measurement. While in the first two cases no additional prediction is necessary, the delayed measurement of vehicle 2 in the third case leads to three prediction steps.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In order to obtain K we need to solve a Discrete-time Algebraic Riccati Equation (DARE) once at the convoy initialization. This is another advantage of this implementation: the prediction is only a single matrix multiplication, i.e., computationally very cheap.

The resulting states are then fed as reference to a classic adaptive cruise control (ACC):

$$v_{i,\mathrm{des}} = v_{i-1} + k_v \Delta v + k_d \Delta d_i \,,$$

where k_v and k_d are tuning factors. A strength of this approach is that, having future states as reference, we are able to handle local delays q by using a smith-predictor-like approach [8]. We do so by defining

$$\Delta v = \Delta v^{k+q} + \Delta v^{k}_{\mathrm{meas}} - \Delta v^{k} \,,$$

where $\Delta v^{k}_{\mathrm{meas}}$ is the actually measured difference in velocity while $\Delta v^{(\cdot)}$ is the reference velocity difference. In other words, we use the predicted state as reference and correct model errors with the actually measured error to the reference. We proceed accordingly for Δd.

4 Lateral

In off-road scenarios, we cannot use the environment's structure (e.g. lane markings or curbsides) for keeping the followers on track. Assuming we have the leader's positions available, we can follow its track. A problem may arise, however, once systematic errors in each follower's control accumulate. This could happen, for instance, on lateral inclines or due to difficult terrain conditions. In this section, we describe how we manage this challenge.

4.1 Offset Correction

The convoy leader drives along a path $\boldsymbol{P}_0$. Each follower i is assumed to be able to estimate its predecessor's path $\boldsymbol{P}_{i-1}$. For this, the leader's positions P_{i-1} are estimated using local sensors and accumulated over time.

If there is a lateral control error ε_i in tracking this desired path, it is transmitted to the successor. Here, let $\varepsilon = \begin{bmatrix} \Delta y & \Delta\psi \end{bmatrix}^\mathsf{T}$ denote the lateral displacement and yaw error, respectively. The successor transforms its P_i:s by the inverse of ε_i. The corrected path $\boldsymbol{P}_i^*$ then resembles $\boldsymbol{P}_{i-1}$, the estimate of the predecessors path (see Figure 2). I.e., observable control errors are not accumulated over the followers.

Nevertheless, path generation and trajectory control rely on the estimate of the (corrected) leader positions P_{i-1}. If the estimates have a systematic error, this will – again – accumulate over the followers. A way to bound this would be to transmit GNSS positions.

In our experience, however, GNSS positions from vehicles with different antennas/receivers often differ when traversing the same path. Hence, one would also need to estimate the relative GNSS offsets and transmit those. This is possible, though not practicable, given the limited radio bandwidth.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

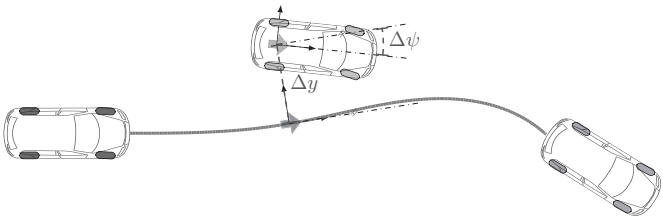


Figure 2: Correcting the reference path by known lateral error $(\Delta y, \Delta\psi)$ of the leader. We show the ego vehicle, its leader and the convoy leader as contours. The tracked and corrected leader positions are shown as arrows. The convoy leader's path is drawn in gray.

Note that this framework still allows for local obstacle avoidance. If one follower detects an obstacle in the lead vehicle's path (e.g. lost load) and drives around it, this is not a control error. Hence its successors will follow the corrected path rather than the one taken by the convoy leader.

4.2 Exemplary Implementation

For single convoys, meaning one leader and one follower, we use vehicle tracking as described in [9] and path generation as described in [10]. The path is generated by optimizing a path through a sequence of estimated leader positions, considering dynamic and kinematic constraints. This remains unchanged, with the only difference being that the estimated leader positions are corrected using ε by first rotating them by $-\Delta\psi$ and then shifting them along their y axes by $-\Delta y$.

5 Technical Implementation

5.1 Communication

In order to achieve efficient V2V communication via a low-bandwidth (19.2 kbit/s) connection, we implemented a simple custom protocol with a focus on using as little bandwidth as possible while maintaining a reasonable degree of robustness against transmission errors. The layout of the protocol's 8-byte message header is shown in Table 1.

Each message begins with an arbitrary fixed byte (`start_symbol`) that the V2V module looks for when parsing raw data received by the V2V hardware. The next two fields contain the IDs of the sender (`sender_id`) and the intended receiver (`receiver_id`) of the message, respectively, with a receiver ID of zero representing broadcast messages that are sent to all convoy members. The members' IDs are set manually on each vehicle's on-board computer.

When the V2V software module receives a message intended for the vehicle it is running on, the message is passed to other modules via the middleware. If the field `send_ack` is 1, the V2V module will send an acknowledgment message containing the message ID (`id`) to the sender. If

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Table 1: Message header

Field	Size in (bit)	Description
`start_symbol`	8	Fixed byte indicating the beginning of a new message
`sender_id`	5	ID of the sender
`receiver_id`	5	ID of the receiver
`send_ack`	1	Flag indicating whether an acknowledgment is requested for this message
`id`	6	ID of this message (used in acknowledgments)
`type`	7	Message type
`payload_size`	8	Size of the payload in bytes
`header_checksum`	8	Checksum computed over the header
`data_checksum`	16	Checksum computed over the payload
Σ	64	= 8 bytes

the sender does not receive the acknowledgment within a specified period of time, it will resend the data. When reading the message from the middleware, the other software modules decide whether to process or ignore the data based on the message type (`type`).

The field `payload_size` specifies how many bytes of actual data will follow the message header. In order to ensure that the header data is correct, the receiver checks the `data_checksum` byte, whose value is the one's complement of the sum of one's complements of the preceding bytes. Similarly, the value of `data_checksum` is the one's complement of the sum of one's complements of the 2-byte words in the payload following the header (zero-padded if the number of bytes is odd).

In order to inform others that they are part of the convoy, each vehicle broadcasts *heartbeat* messages every 3 seconds. If different types of V2V hardware (e.g., radio transmitters and wireless network adapters) are used simultaneously, vehicles using multiple types of communication interfaces will forward messages received through one interface via all other interfaces. Hence, if vehicles A and B communicate via radio transmitters while B and C use wi-fi communication, B will forward messages from A to C and vice versa. For the sake of simplicity, however, we do not use any kind of loop prevention, which means the convoy operator has to ensure that there are no loops.

We also tried to minimize the size of the sent messages. The complete member-status message can, e.g., be seen in Table 2. Here, each state value only consists of two bytes. This is possible without losing too much precision by using known lower and upper bounds and discretizing the values on the resulting interval. E.g., the accelerations are within $-10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$ to $10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

5.2 Safety Layer

In addition to the described algorithms, there are several safety measures in place. One reason for this being necessary is that the chosen implementation of the cooperative cruise control is linear. This means that there is no way to handle constraints on states, e.g., non-negative distances between vehicles.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Table 2: Convoy member status

	Variable	Size in (bit)	Description
	convoy_id	8	Unique identifier in case multiple convoys are in reach
	member_index	8	Position within this convoy
	data_timestamp	32	GPS time at which this data was recorded
state	acceleration	16	current measured/estimated acceleration
state	velocity	16	current measured/estimated velocity
state	distance	16	current measured/estimated distance to leading vehicle
state	displacement	16	current displacement to lead vehicle's measured/estimated track
state	yaw_error	16	current yaw error regarding lead vehicle's measured/estimated track
	Σ	128	= 16 bytes

In order to make sure each follower is able to brake in time, even if the predecessor is behaving non-cooperatively, the commanded velocity is upper-bounded. This upper bound is a predefined constant-jerk brake trajectory taking into account the ego vehicle's dynamic constraints. The brake trajectory is evaluated at the distance to the predicted point where the lead vehicle would stop if it started braking hard 200 ms after the last measurement.

An additional safety feature uses the advantages of V2V communication: If one convoy member's absolute deceleration is above a certain threshold, an emergency brake message is broadcast. The message contains the index of the member currently performing an emergency braking maneuver, leading to all successors also initiating an emergency braking maneuver.

6 Results

We tested the proposed framework both in real-world scenarios and in simulation. First, we will show the lateral-offset correction using our autonomous cars. Then, we will show the longitudinal dampening in simulation, since the effect is better shown with more vehicles than the two we have at our disposal.

6.1 Lateral Correction

Our practical setup consists of a manually driven lead vehicle and two fully actuated followers. The lead vehicle is equipped with a sensor box, capable of determining its velocity from a cheap GPS receiver and IMU and broadcasting it via narrowband radio. The followers are MuCAR-3- (Munich Cognitive Autonomous Robot Car 3$^{\text{rd}}$ Generation) and MuCAR-4, two fully drive-by-wire-enabled cars.

We used small-bandwidth radio to communicate between the lead vehicle and the first follower (MuCAR-4) and WLAN between first and second follower (MuCAR-3). Note that our communication framework allows for inhomogeneous nets and forwards messages to convoy members that are not directly reachable. A status message needs $64 + 128 = 192$ bit (header + payload). Due to fair conditions, we had all members send at 10 Hz, resulting in 30% usage of the nominally available bandwidth. For hard off-road conditions, for instance signal dampening due to wet

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

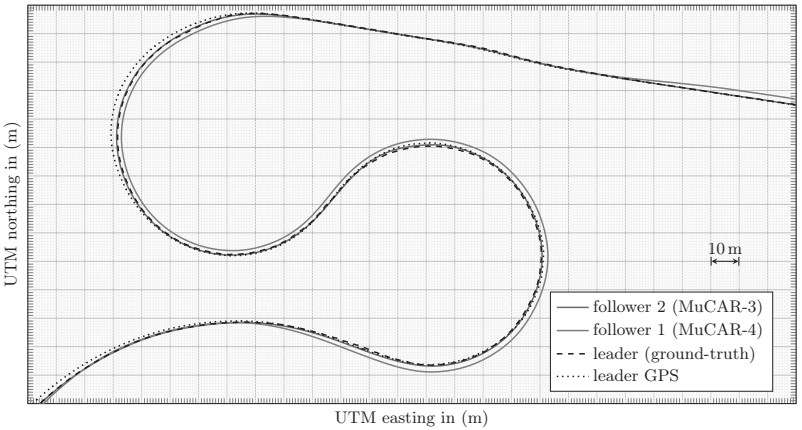


Figure 3: Paths of the manually driven lead vehicle and the two following vehicles. The purposely introduced lateral control errors of the first follower are disregarded by the second. This is RTK-GPS ground truth data. Additionally, the recorded GNSS track of the lead vehicle is shown dotted in order to demonstrate that control on GPS-basis without offset correction from local sensors is not feasible.

woods, and especially for longer platoons, we recommend to not using more than 20%.

The test scenario for showing the lateral-offset correction can be seen in Figure 3. There, the vehicles' paths, recorded with RTK-GPS, are drawn in UTM coordinates. The first follower purposely introduced some lateral control error, which the second follower was able to correct due to V2V communication. As a result, the second follower tracks the convoy leader's path, rather than the direct predecessor's path.

To show how important it is to use local perception, we additionally plotted the GPS path recorded by the lead vehicle. Even with open-sky conditions, the offset to the ground truth recorded using RTK-DGPS is sizable. This shows once more that GPS signals cannot be used directly for off-road convoy applications.

6.2 Longitudinal Dampening

Since we only have two autonomous vehicles at our disposal, the dampening effect in longitudinal convoy direction is shown in simulation. The simulated vehicles each ran on a different computer, communicating via network and providing the vehicles' non-linear dynamics by simulating low-level control, actuator dynamics, delays etc. The main difference to the real-world setup is that we provide an exact estimate on the lead vehicle every 100 ms instead of getting an estimate from a vehicle-tracking module at approximately 20 Hz camera frame rate.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

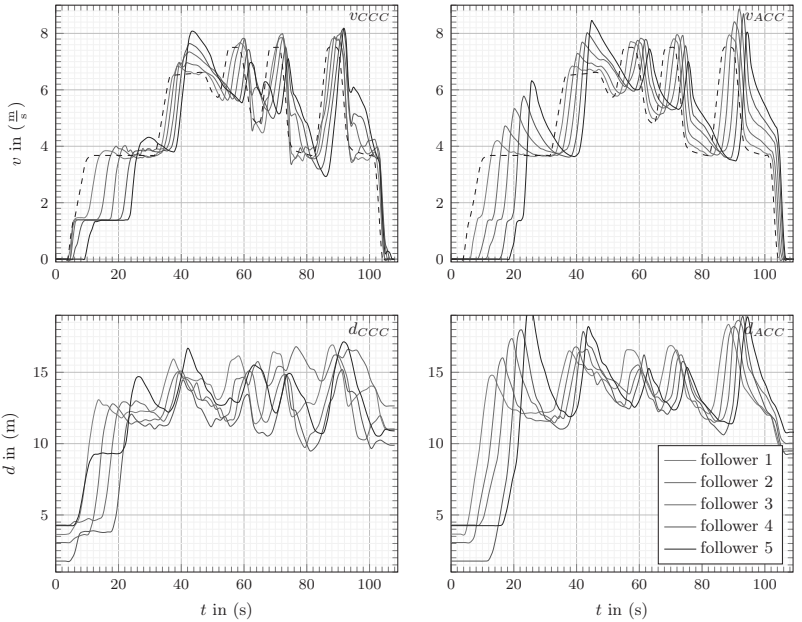


Figure 4: Longitudinal performance for a simulated 6-vehicle setup using CCC (left-hand side) and ACC (right-hand side). The desired distance is $\max(10, 6 + 0.8 \cdot v_i)$ and was omitted for clutter reduction. Especially when the assumption of near-constant convoy-leader velocity holds, the CCC shows superior convergence behavior.

We used a setup of 6 simulated cars where the convoy leader follows a challenging velocity profile, see Figure 4. Again, using 30% of the available bandwidth, we have the lead vehicle send with 10 Hz and the 5 followers with 4 Hz. As a comparison, we simulated the same scenario using a chain of ACC-controlled vehicles.

We see that over the number of followers, the velocity profile is dampened and the convergence behavior, especially when starting, is superior in the cooperative cruise control (CCC) case. However, in the more dynamic middle part of the roughly 1 km long drive we can see more jitter in the velocity profiles of the first followers. This is due to the slow updates from all convoy members and the unsteady convoy leader's velocity profile. However, this effect is declining for the later followers and could be tuned by increasing the cost of acceleration when computing the reference solution. Here, we tried to find a balance between minimizing the root-mean-square (RMS) error of velocities and distances while maintaining good dampening. For example, comparing the RMS of Δv_5 (0.64 for the CCC and 0.78 for ACC) and Δd_5 (2.59 and 3.87), we achieved a reduction of 17.9% and 33.1% for the 5th follower, respectively.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

7 Conclusion

In this paper, we described a framework to stabilize a multi convoy in an off-road environment. We provided an example implementation which was evaluated both in simulation and real-world tests. Additionally, we detailed how we were able to maximally facilitate the low available bandwidth for V2V communication.

While the longitudinal controller is based on a simple linearization it proved to work even with sparse data. This holds as long as all convoy members behave cooperatively and thus predictably. An additional safety layer was introduced in order to ensure collision avoidance for all other cases. The algorithm could easily be improved at computational cost by introducing a reference generation that allows for constraints, for instance using quadratic programming instead of the used DARE solution.

A lateral correction was necessary due to the possibility of the accumulation of systematic errors. The proposed solution was readily implemented into an existing path-generation module. It works well when each vehicle is able to estimate its own control error and for limited platoon lengths. For very long platoons, this could be improved using GPS information if one can also estimate the relative GPS offsets.

The performance increase was possible due to V2V communication. We used a custom protocol and tightly packed messages to maximally utilize the bandwidth. This could be further improved by splitting the status message up such that the lead vehicle only sends its velocity and the lateral-correction data is only sent to the direct successor.

A major improvement could be achieved if the lead vehicle drove autonomously itself. This way, we would not need to assume constant velocity but would be able to follow the lead vehicle's future velocity profile. However, the use case of a manual driver leading the platoon through dangerous terrain did not permit this.

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge funding by the Federal Office of Bundeswehr Equipment, Information Technology and In-Service Support (BAAINBw).

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

References

[1] M. Alfraheed, A. Dröge, M. Klingender, D. Schilberg, and S. Jeschke, "Longitudinal and Lateral Control in Automated Highway Systems: Their Past, Present and Future," Aachen, Germany, Dec. 2011.

[2] C. Bergenhem, H. Pettersson, E. Coelingh, C. Englund, S. Shladover, and S. Tsugawa, "Overview of Platooning Systems," in *Proceedings of the 19th ITS World Congress*, Vienna, Austria, Oct. 2012.

[3] O. Gehring and H. Fritz, "Practical Results of a Longitudinal Control Concept for Truck Platooning with Vehicle to Vehicle Communication," Boston, MA, USA, Nov. 1997.

[4] F. Morbidi, P. Colaneri, and T. Stanger, "Decentralized Optimal Control of a Car Platoon with Guaranteed String Stability," Zurich, Switzerland, Jul. 2013.

[5] A. Geiger, M. Lauer, F. Moosmann, B. Ranft, H. Rapp, C. Stiller, and J. Ziegler, "Team AnnieWAY's Entry to the 2011 Grand Cooperative Driving Challenge," vol. 13, pp. 1008–1017, Sep. 2012.

[6] D. Swaroop and J. K. Hedrick, "String Stability of Interconnected Systems," vol. 41, no. 3, Mar. 1996.

[7] X. Liu, A. Goldsmith, S. S. Mahal, and J. K. Hedrick, "Effects of Communication Delay on String Stability in Vehicle Platoons," Oakland, CA, USA, Aug. 2001.

[8] O. Smith, "Closer Control of Loops with Dead Time," *Chemistry Engineering Progress*, vol. 53, no. 5, pp. 217–219, 1957.

[9] C. Fries, T. Luettel, and H.-J. Wuensche, "Combining Model- and Template-based Vehicle Tracking for Autonomous Convoy Driving," Gold Coast, Queensland, Australia, Jun. 2013.

[10] D. Fassbender, B. C. Heinrich, T. Luettel, and H.-J. Wuensche, "An Optimization Approach to Trajectory Generation for Autonomous Vehicle Following," in *submitted for publication*, 2017.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Modellprädiktive Regelung zur Querführung automatisierter Fahrzeuge

M. Sc. **Jochen Gallep**, Prof. Dr.-Ing. **Steffen Müller**,
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Kraftfahrzeuge, Berlin

Kurzfassung

Aktuelle aktive Fahrerassistenzfunktionen unterstützen den Fahrer bei der Fahrzeugquerführung in spezifischen Fahrszenarien und in einem begrenzten Geschwindigkeitsbereich. Auf dem Weg zum automatisierten Fahren ist es erforderlich, geeignete Querregelungen zu entwickeln, welche das Fahrzeug auch bei unterschiedlichen Fahrszenarien und Geschwindigkeiten sicher führen. In diesem Beitrag wird dazu ein modellprädiktiver Querregler vorgestellt, welcher durch eine geschwindigkeitsabhängige Adaption von Prädiktionsmodell und Wichtungen eine optimale Stellgrößenfolge für unterlagerte Lenkwinkelregelkreise bereitstellt, um dadurch eine stabile und exakte Querführung zu gewährleisten.

1. Einleitung

Die sichere Querführung automatisierter Fahrzeuge im Straßenverkehr mittels EPS-Lenkung stellt hohe Anforderungen an die durch einen Querregler zu realisierende Regelaufgabe. Dazu zählt insbesondere ein gutes Führungsverhalten bei unterschiedlichen Fahrmanövern zur Vermeidung potenzieller Gefahrensituationen. Zur Minimierung der Fahrzeugquerabweichung gilt es, unter Berücksichtigung des zukünftigen Kursverlaufes als auch der EPS Beschränkungen eine optimale Stellgrößenfolge zu berechnen.

Eine mögliche Regelungsmethode stellt in diesem Zusammenhang die modellprädiktive Regelung (MPC) dar. Diese ermöglicht es, Beschränkungen der Lenkwinkeländerungsraten $d\delta/dt$ und des Lenkwinkels δ direkt bei der Berechnung der optimalen Stellgrößenfolge zu berücksichtigen. Durch das Prinzip des gleitenden Horizontes werden zukünftige Kursverläufe mit in die Berechnung der optimalen Stellgrößenfolge einbezogen. In [1] wird dazu ein MPC mit nichtlinearem Prädiktionsmodell zur Querführung autonomer Fahrzeuge vorgestellt. Der zur Lösung des nichtlinearen Optimierungsproblems erhöhte Rechenaufwand ermöglicht in Echtzeit dabei nur eine geringe Neuplanungsfrequenz der zukünftigen Stellgrößenfolge. [2] und [3] nutzen deshalb Linearisierungen des nichtlinearen Prädiktionsmodells zur Berechnung der Stellgrößenfolge. Für die Berechnung der Querabweichung wird der Fahrzeug-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

schwerpunkt zugrunde gelegt. Die Reglerperformance wird anhand von Ausweich- und Spurwechselmanöver bei ca. $15\ m/s$ getestet.

Im realen Fahrzeug ist die Lage des Schwerpunktes beladungsabhängig und deshalb ohne vorherige Messungen nicht eindeutig bekannt. Aufgrund dessen wird meist ein eindeutig definierter geometrischer Ort am Fahrzeug verwendet, wie z.B. der Schnittpunkt zwischen Fahrzeuglängs- und Vorderachse. Im Rahmen dieser Arbeit soll deshalb der Einfluss des Bezugspunktes zur Bestimmung der Querabweichung auf die Reglerauslegung und Reglerperformance untersucht werden. Des Weiteren gilt es, den Einsatzbereich des Reglers auf unterschiedliche Manöver und Fahrzeuggeschwindigkeiten zu erweitern. Der Fokus liegt dabei auf niedrigen Geschwindigkeiten $(1 - 2\ m/s)$ und geringen Kurvenradien $(< 10\ m)$ wie sie typischerweise beim Ein- und Ausparken auftreten und hochdynamischen Manövern mit erhöhter Geschwindigkeit.

2. Spurregelkreis

In Bild 1 ist der querdynamische Regelkreis bestehend aus Fahrzeug, EPS-Lenkung und MPC-Querregler abgebildet. Der Sollkurswinkel $\Theta_{soll} = \arctan(dy/dx)$ berechnet sich aus dem im xy-Koordinatensystem vorliegendem Sollpfad, welcher das Fahrzeug folgen soll. Der MPC erhält als Sollwertvorgabe zu jedem Zeitschritt eine diskrete Menge an Sollkurswinkeln $\boldsymbol{\Theta_{soll}}$, welche den zukünftigen Pfadverlauf abbilden. Des Weiteren werden dem Regler die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit v, die Gierrate $\dot{\psi}$, der Gierwinkel ψ, die Querabweichung dy, und der Radlenkwinkel δ zugeführt. Die Stellgrößenvorgabe δ_{soll} des MPC wird durch einen unterlagerten Winkelregelkreis in der EPS-Lenkung umgesetzt.

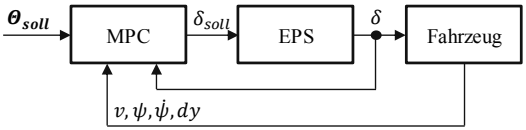


Bild 1: Querdynamischer Regelkreis

3. Prädiktionsmodell

Ein zentraler Bestandteil des MPC ist das Prädiktionsmodell, mit dessen Hilfe das zukünftige Fahrzeugverhalten berechnet werden kann. Das Ziel ist es dabei, die Querabweichung dy für zukünftige Radlenkwinkelvorgaben δ_{soll} vorherzusagen. Bild 2 zeigt dazu die für die Berechnung von dy relevanten Größen. Die Größe v_v repräsentierte dabei den Geschwindig-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

keitsvektor des Vorderrades welcher zum Inertialsystem den Winkel γ einschließt. Die Kurswinkel $\Theta_{soll,k+i}$ entsprechen dem zukünftigen Sollkurswinkelverlauf zu diskreten Zeitpunkten. Auf Grundlage trigonometrischer Beziehungen berechnet sich der Winkel γ wie folgt:

$$tan(\delta - \alpha_v) = \frac{vsin\beta + l_v\dot{\psi}}{vcos\beta} \approx \beta + l_v\frac{\dot{\psi}}{v} \tag{3.1}$$

$$\Rightarrow \gamma = \psi + \delta - \alpha_v = \psi + \beta + l_v\frac{\dot{\psi}}{v} \tag{3.2}$$

Die Änderungsrate der Querabweichung ergibt sich dann aus der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Kurswinkeldifferenz ΔΘ zu:

$$d\dot{y} = v_v sin(\gamma - \Theta_{soll}) \approx v(\gamma - \Theta_{soll}) = v(\psi + \beta + l_v\frac{\dot{\psi}}{v} - \Theta_{soll}) \tag{3.3}$$

Die Berechnung der fahrdynamischen Zustände $\dot{\psi}$ und β werden zu Vergleichszwecken durch ein dynamisches, als auch durch ein kinematisches Einspurmodell durchgeführt.

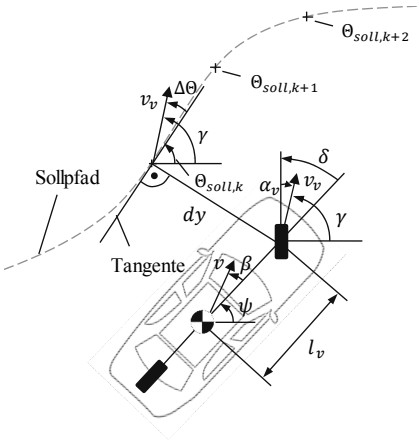


Bild 2: Fahrzeugquerdynamik mit Sollpfad

Das kinematische Modell beschreibt das Fahrzeugverhalten aufgrund der Vernachlässigung des auftretenden Schräglaufwinkels α_v weniger genau, allerdings wird ausschließlich der Fahrzeugradstand zur Parametrierung benötigt. Zudem kann das kinematische Modell auch für Geschwindigkeiten von $v = 0$ genutzt werden, da keine Divison durch v auftritt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3.1. Kinematisches Einspurmodell

Bei Vernachlässigung der Fahrzeugmasse und Fahrzeugträgheit kann die Bewegung rein geometrisch mithilfe des Ackermannwinkels entsprechend Gleichungen (3.4) und (3.5) berechnet werden.

$$\dot{\psi} = \frac{v}{R} = v\frac{\delta}{L} \tag{3.4}$$

$$\beta \approx \frac{L}{2R} = \frac{\delta}{2} \tag{3.5}$$

R entspricht dabei dem Kurvenradius und $L = l_v + l_h$ dem Radstand.

3.2. Dynamisches Einspurmodell

Durch das lineare Einspurmodell nach [4] lässt sich die Fahrzeugquerdynamik als Zustandsraumdarstellung mit den Parametern Schräglaufsteifigkeit (c_α), Trägheitsmoment um die z-Achse (J), Fahrzeugmasse (m) und Vorder- und Hinterachsabstand zum Schwerpunkt (l_v, l_h) wie folgt beschreiben:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\dot{\psi}\\ \beta\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c_{\alpha,v}l_v^2 + c_{\alpha,h}l_h^2}{v J} & -\frac{c_{\alpha,v}l_v - c_{\alpha,h}l_h}{J} \\ -1 - \frac{c_{\alpha,v}l_v - c_{\alpha,h}l_h}{v^2 m} & -\frac{c_{\alpha,v}+c_{\alpha,h}}{vm}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\psi}\\ \beta\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\frac{c_{\alpha,v}l_v}{J}\\ \frac{c_{\alpha,v}}{vm}\end{bmatrix}\delta \tag{3.6}$$

3.3. Lenkungsdynamik

Die Vorgabe δ_{soll} des MPC muss durch unterlagerte Regelkreise in der EPS-Lenkung eingeregelt werden. Das sich dabei ergebende Regelkreisverhalten der Lenkung kann näherungsweise durch ein PT2 Glied mit der Verstärkung K, der Dämpfung d und der Zeitkonstanten T entsprechend Formel (3.7) beschrieben werden [5].

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\delta\\ \dot{\delta}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ \frac{-1}{T^2} & \frac{-2d}{T}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta\\ \dot{\delta}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ \frac{K}{T^2}\end{bmatrix}\delta_{soll} \tag{3.7}$$

3.4. Gesamtmodell

Nach dem zusammenfassen der Gleichungen (3.3), (3.6) und (3.7) ergibt sich das folgende lineare, zeitvariante Prädiktionsmodell, wobei Θ_{soll} als Störgröße betrachtet wird:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\delta\\ \dot{\delta}\\ \dot{\psi}\\ \beta\\ \psi\\ dy\end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ \frac{-1}{T^2} & \frac{-2d}{T} & 0 & 0 & 0 & 0\\ \frac{c_{\alpha,v}l_v}{J} & 0 & -\frac{c_{\alpha,v}l_v^2 + c_{\alpha,h}l_h^2}{vJ} & -\frac{c_{\alpha,v}l_v - c_{\alpha,h}l_h}{J} & 0 & 0\\ \frac{c_{\alpha,v}}{vm} & 0 & -1 - \frac{c_{\alpha,v}l_v - c_{\alpha,h}l_h}{v^2 m} & -\frac{c_{\alpha,v}+c_{\alpha,h}}{vm} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & l_v & v & v & 0\end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{dyn}(v)}\begin{bmatrix}\delta\\ \dot{\delta}\\ \dot{\psi}\\ \beta\\ \psi\\ dy\end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix}0\\ \frac{K}{T^2}\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_{dyn}}\delta_{soll} + \underbrace{\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ -v\end{bmatrix}}_{\mathbf{E}_{dyn}(v)}\Theta_{soll}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$dy = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}_{dyn}} \begin{bmatrix} \delta & \dot{\delta} & \dot{\psi} & \beta & \psi & dy \end{bmatrix}^T \tag{3.8}$$

Die Zeitabhängigkeit der Matrizen $\boldsymbol{A}_{dyn}(v)$ und $\boldsymbol{E}_{dyn}(v)$ ergibt sich durch die Anforderung einer geschwindigkeitsadaptiven Querregelung. In einem Bereich von $v = 1 - 30\,m/s$ wird dazu eine Menge parameterabhängiger Matrizen bestimmt.

Zur Analyse des Übertragungsverhaltens von $G(s) = dy(s)/\delta(s)$ ist in Bild 3 das Pol-Nullstellen Diagramm für einen Geschwindigkeitsbereich von $v = 1 - 30\,m/s$ dargestellt. Aufgrund des Poles auf der imaginären Achse der s-Halbebene ist das System grenzstabil. Die Impulsantwort entspricht dadurch bei $\Theta_{soll} = 0$ einer linear ansteigenden Funktion für dy. Mit zunehmender Geschwindigkeit verschieben sich die Pole in Richtung abnehmender Dämpfung. Das System bleibt aber weiterhin grenzstabil. Die Aufgabe des MPC besteht dementsprechend darin, das System unter Einhaltung der Systembeschränkungen auf dem Sollpfad zu stabilisieren.

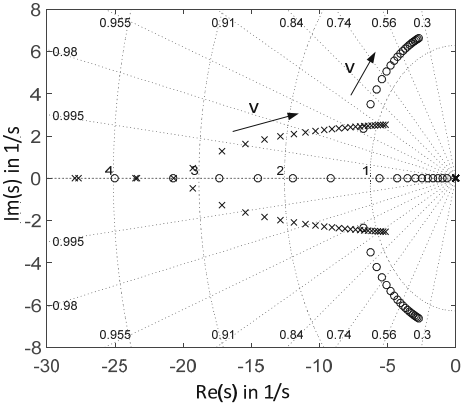


Bild 3: Pol-Nullstellen Diagramm von $G(s) = dy(s)/\delta(s)$

Wird statt dem dynamischen das kinematische Einspurmodell zugrunde gelegt, ergibt sich das reduzierte Prädiktionsmodell nach Gleichung (3.9).

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\delta\\ \dot{\delta}\\ \psi\\ dy\end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ \frac{-1}{T^2} & \frac{-2d}{T} & 0 & 0\\ \frac{v}{l_v+l_h} & 0 & 0 & 0\\ v(\frac{1}{2}+\frac{l_v}{l_v+l_h}) & 0 & v & 0\end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{kin}(v)}\begin{bmatrix}\delta\\ \dot{\delta}\\ \psi\\ dy\end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix}0\\ \frac{K}{T^2}\\ 0\\ 0\end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_{kin}}\delta_{soll} + \underbrace{\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ -v\end{bmatrix}}_{\mathbf{E}_{kin}(v)}\Theta_{soll} \tag{3.9}$$

$$dy = \underbrace{\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}}_{\mathbf{C}_{kin}}\begin{bmatrix}\delta & \dot{\delta} & \psi & dy\end{bmatrix}^T$$

Das charakteristische Polynom der Zustandsraumdarstellung (3.9) ergibt sich zu:

$$p = \lambda^2(\lambda^2 + \lambda\frac{2d}{T} + \frac{1}{T^2}) \tag{3.10}$$

Die Nullstellen des Polynoms entsprechen den Eigenwerten des Systems, wobei eine doppelt Nullstelle auf der imaginären Achse liegt. Das System weist dementsprechend ebenfalls ein grenzstabiles Verhalten auf, allerdings ist die Lage der Eigenwerte unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit.

Die folgenden Umformungen gelten für die Zustandsraumdarstellungen (3.8) und (3.9) in gleicher Weise, weshalb auf eine Unterscheidung zwischen kinematischem und dynamischem Modell verzichtet wird. Für die Auslegung des MPC werden die Matrizen $\boldsymbol{B}$ und $\boldsymbol{E}(v)$ zu einer Eingangsmatrix $\boldsymbol{B}(v)$ zusammengefasst und anschließend mit der Abtastschrittweite T_s entsprechend [6] diskretisiert (Gleichung (3.11)).

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{A}(v)_d = \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}(v)T_s}, \quad \boldsymbol{B}(v)_d = \int_0^{T_s}\mathrm{e}^{\boldsymbol{A}(v)\alpha}d\alpha\boldsymbol{B}(v)\\ &\boldsymbol{C}_d = \boldsymbol{C}, \quad \boldsymbol{D}_d = \boldsymbol{D}\end{aligned} \tag{3.11}$$

4. Modellprädiktiver Regler

Zu Vergleichszwecken werden die vorgestellten Prädiktionsmodelle genutzt, um unterschiedliche modellprädiktive Regler aufzubauen. Die innere Struktur des MPC ist in Bild 4 dargestellt. Der Block „Prädiktionsmodell“ beinhaltet die diskretisierte Zustandsraumdarstellung (3.8) bzw. (3.9). Vor jedem Präditkionszyklus muss der Zustandsvektor des Prädiktionsmodells mit den aktuellen Zuständen der Regelstrecke initialisiert werden. Da der Schwimmwinkel β als gemessene Größe meist nicht zur Verfügung steht und die restlichen Messgrößen mit einem Rauschanteil behaftet sind, wird ein Kalman-Filter zur Schätzung der Zustände $\hat{x}(k)$ verwendet. Das Modell des Kalman-Filters wird dabei ebenso wie das Prädiktionsmodell in Abhängigkeit der Geschwindigkeit angepasst.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

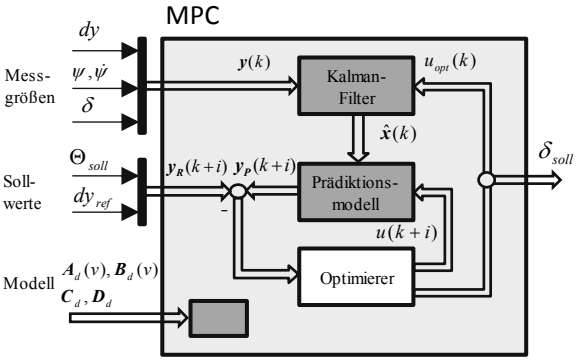


Bild 4: Struktur des MPC

Der Optimierer hat die Aufgabe die optimale Stellgrößenfolge zu bestimmen, welche die Gütefunktion (4.1) minimiert. Konstante Parameter des MPC wurden dabei wie folgt gewählt:

- MPC Sampletime: $T_{MPC} = 20\ \mathrm{ms}$
- Prädiktionshorizont: $n_p = 50$
- Kontrollhorizont: $n_c = 20$
- Vorschauweite: $T_{vor} = T_{MPC} n_p = 1\ \mathrm{s}$
- MPC Vorgabe: $dy_{ref} = 0,\ \delta_{target} = 0$

Die Variable k entspricht dem aktuellen Kontrollintervall und i dem Summationsindex.

$$J = \underbrace{q \sum_{i=1}^{n_p} [(dy(k+i) - dy_{ref}(k+i)]^2}_{J_{dy}} + \underbrace{r_1 \sum_{i=1}^{n_c} [\delta_{soll}(k+i-1) - \delta_{soll}(k+i-2)]^2}_{J_{\Delta\delta_{soll}}} + \underbrace{r_2 \sum_{i=1}^{n_c} [\delta_{soll}(k+i-1) - \delta_{target}(k+i-1)]^2}_{J_{\delta_{soll}}} \tag{4.1}$$

Der Term J_{dy} gewichtet die Querabweichung, $J_{\Delta\delta_{soll}}$ die Lenkwinkeländerungsrate und $J_{\delta_{soll}}$ den Absolutwert des Lenkwinkels.

Die Sampletime T_{MPC} entspricht dabei der Taktrate der EPS-Lenkung und garantiert somit eine gleichmäßige Sollwertänderung um eine Destabilisierung des Winkelregelkreises zu

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

vermeiden. Die Wahl der Vorschauweite stellt einen Kompromiss zwischen Stabilitätsanforderung an den Gesamtregelkreis und der erforderlichen Rechenleistung da, um einen Prädiktionszyklus sicher innerhalb von T_{MPC} in Echtzeit berechnen zu können. Zur Beurteilung der Echtzeitfähigkeit wurde der MPC auf einer dSpace MicroAutoBox II getestet. Mit einer Durchlaufzeit von ca. $5\,ms$ konnte der Prädiktionszyklus innerhalb von T_{MPC} und damit in Echtzeit berechnet werden.

Der Eingang des Lenkwinkelreglers zum Intervall k ist $\delta_{soll}(k) = \delta_{soll}(k-1) + \Delta\delta_{soll}(k)$ mit:

$$\Delta\boldsymbol{\delta}_{soll}(k) = \begin{bmatrix} \Delta\delta_{soll}(k) \\ \Delta\delta_{soll}(k+1) \\ \vdots \\ \Delta\delta_{soll}(k+n_c-1) \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

Die Berechnung der optimalen Stellgrößenfolge erfolgt durch die Umformung und Lösung der Differentialgleichung

$$\min_{\Delta\boldsymbol{\delta}_{soll}(k)} J(\Delta\boldsymbol{\delta}_{soll}(k)) \Rightarrow \frac{\partial J(\Delta\boldsymbol{\delta}_{soll}(k))}{\partial\Delta\boldsymbol{\delta}_{soll}(k)} = 0 \tag{4.3}$$

unter Berücksichtigung der Beschränkungen

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{\delta}_{soll,min} < \boldsymbol{\delta}_{soll}(k) < \boldsymbol{\delta}_{soll,max} \\ &\Delta\boldsymbol{\delta}_{soll,min} < \Delta\boldsymbol{\delta}_{soll}(k) < \Delta\boldsymbol{\delta}_{soll,max} \end{aligned} \tag{4.4}$$

Durch die Wahl eines über den Prädiktionshorizont linearen Prädiktionsmodells und einer quadratischen Gütefunktion, ergibt sich nach Formel (4.3) ein quadratisches Optimierungsproblem, welches effizient durch Standard QP-Verfahren gelöst werden kann [7,8].

5. Simulationsergebnisse

Für die Untersuchung des Regelverhaltens wurde als Validierungsmodell ein nichtlineares Lenkungs- und Einspurmodell inklusive Winkelregelkreis genutzt. Erste Untersuchungen haben dabei gezeigt, dass Stabilität und Führungsverhalten im Wesentlichen durch die Wichtungen q und r_2 beeinflusst werden. Die Wichtung r_1 beeinflusst die Höhe der auftretenden Querbeschleunigungswechsel, welche eine maßgebliche Größe zur Beurteilung des Fahrkomforts darstellt [9]. Im Fokus dieser Arbeit steht eine stabile und exakte Fahrzeugquerführung, weshalb eine konstante Wichtung von $r_1 = 1$ gewählt wurde.

Um die Auswirkung der Wichtungen q und r_2 bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf die Reglerperformance beurteilen zu können, wird im Folgenden das Spurwechselmanöver aus Bild 5 betrachtet. Als Kriterium für die Reglerperformance wird die während der Manöverausführung maximal auftretende Querabweichung dy_{max} gewählt. Das Spurwechselmanöver wird dazu für Geschwindigkeiten von $2 - 20\,m/s$ durchfahren. Bei jeder Geschwindig-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

keit werden die Wichtungen mehrfach variiert um deren Einfluss auf dy_{max} beurteilen zu können.

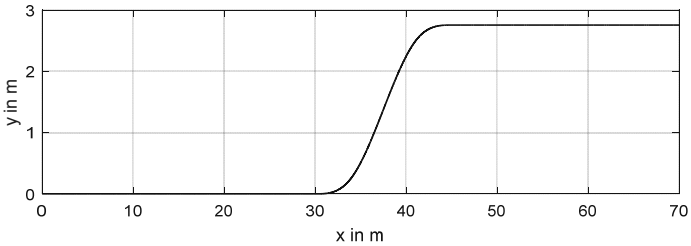


Bild 5: Spurwechsel

In Bild 6 sind die Simulationsergebnisse als auch die optimierten Geschwindigkeitsabhängigen Verläufe der Wichtungen dargestellt. Aufgrund des erhöhten Lenkwinkelbedarfes bei niedrigen Geschwindigkeiten, führt eine Reduktion der Gewichtung von δ_{soll} zu einer Verringerung der maximal auftretenden Querabweichung.

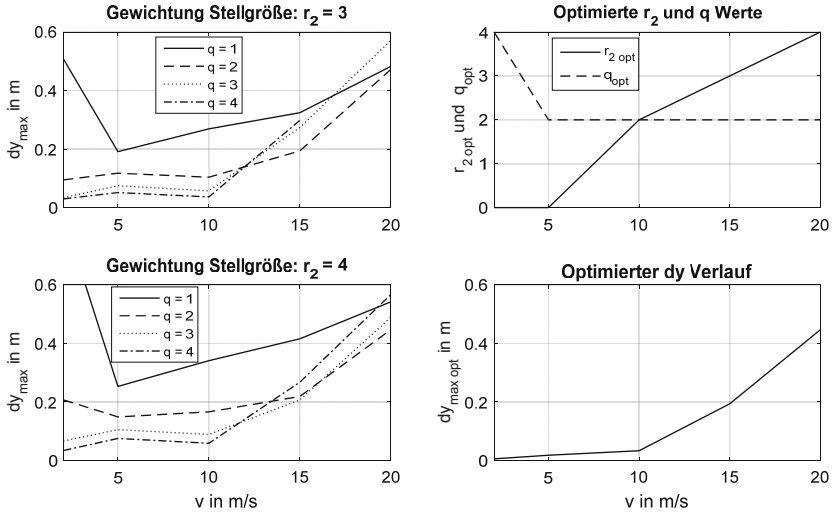


Bild 6: Optimierung der Wichtungen

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Wichtung q der Querabweichung kann dabei groß gewählt werden, da aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten keine Destabilisierung des Regelkreises zu befürchten ist. Bei höheren Geschwindigkeiten wirkt die Wichtung r_2 hingegen stabilisierend und reduziert die Höhe der Stellgrößeneingriffe. Generell lässt sich feststellen, dass eine Erhöhung von r_2 und eine Reduzierung der Wichtung q die Stabilitätsreserve des Regelkreises erhöht, was sich allerdings in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen negativ auf das Führungsverhalten auswirkt. Tabelle 1 fasst den prinzipiellen Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit, Lenkwinkelbedarf und der sich daraus resultierenden Wichtungen zusammen.

Tabelle 1: Qualitativer Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und Wichtungen

Geschwindigkeit	Herausforderung	Lenkwinkelbedarf δ_{soll}	Wichtungen
niedrig	Sollwertfolge	hoch	r_2: niedrig, q: hoch
hoch	Stabilität	niedrig	r_2: hoch, q: niedrig

Um das Regelverhalten des MPC bei unterschiedlichen Kurvenradien beurteilen zu können, wird der Handlinkgskurs (HLK) in Bild 7 als Sollpfad verwendet. Im Bereich der Auffahrt auf den HLK treten dabei minimale Kurvenradien bis zu $8\,m$ auf. Dieser Bereich wird mit einer Geschwindigkeit von $2\,m/s$ und den optimierten Werten für r_2 und q durchfahren. Die Kurvenradien des gesamten Kurses liegen anschließend zwischen $48\,m$ und $101\,m$.

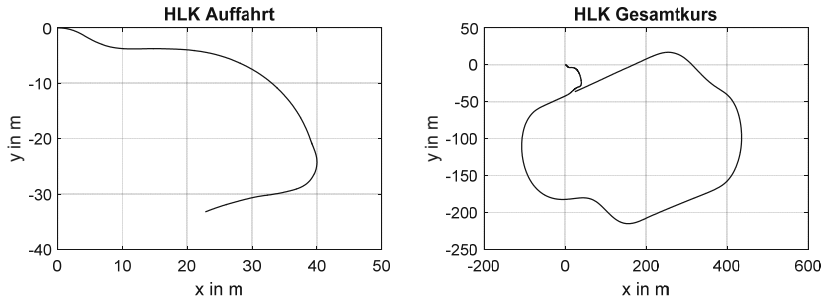


Bild 7: Sollpfad von Handlingkurs mit Auffahrt

In Bild 8 sind die Simulationsergebnisse für den Auffahrtsbereich mit unterschiedlichen Prädiktionsmodellen über die Bogenlänge u dargestellt. Die durchgezogene Linie repräsentiert die Ergebnisse mit dem dynamischen Einspurmodell und der Berechnung von dy an der

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Vorderachse. Der gepunktete Verlauf wurde mithilfe des kinematischen Einspurmodells ermittelt. Aufgrund der geringen auftretenden Querbeschleunigungen, zeigen beide Prädiktionsmodelle ein vergleichbares Regelverhalten. Wird die Querabweichung statt an der Vorderachse mithilfe des Zusammenhangs $d\dot{y} = v(\psi + \beta - \Theta_{soll})$ am Fahrzeugschwerpunkt (CoG) prädiziert, ergibt sich ein von den ersten beiden Ergebnissen deutlich abweichender Verlauf. Aufgrund der geringen Kurvenradien während der Auffahrsituation kommt es über die Länge l_v zu einer signifikanten Änderung der Querabweichung. Die am Schwerpunkt prädizierte Querabweichung stimmt dann nicht mehr mit der gemessenen an der Vorderachse überein, was zu einer Verschlechterung des Führungsverhaltens des Reglers führt.

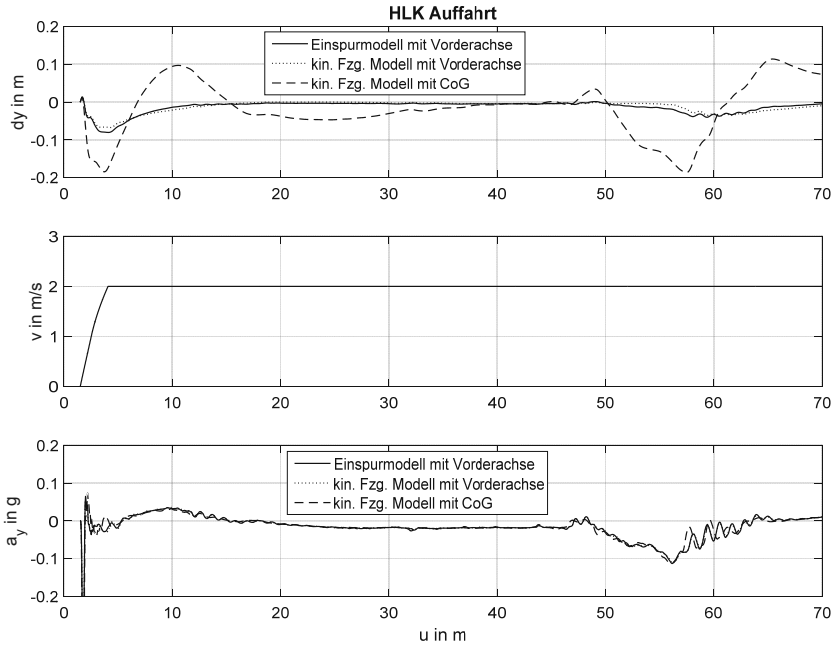


Bild 8: MPC mit optimierten Wichtungen in der Auffahrt des Handlingkurses

Bild 9 zeigt die Simulationsergebnisse für Kurvenradien bis $101\,m$. Um das Regelverhalten auch im fahrdynamischen Grenzbereich beurteilen zu können, wird der HLK mit einer Geschwindigkeit von $20\,m/s$ durchfahren. Dabei bildet das kinematische Einspurmodell den Zusammenhang zwischen δ und β bzw. $\dot{\psi}$ nur noch unzureichend ab. Die dadurch verur-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

sachte fehlerhaft Prädiktion von dy führt zu einer erhöhten Querabweichung. Das dynamische Einspurmodell zeigt demgegenüber auch bei höheren Querbeschleunigungen ein gutes Führungsverhalten.

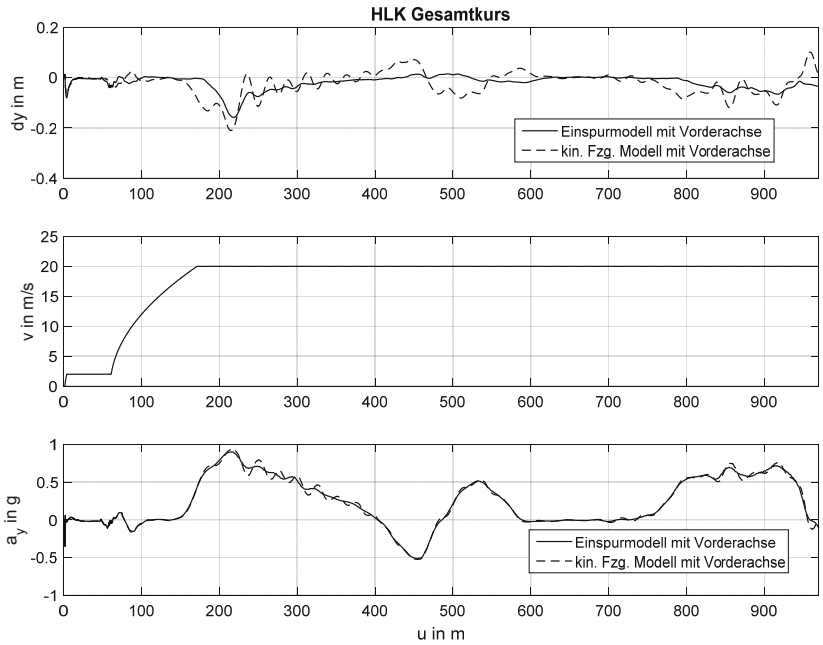


Bild 9: MPC mit optimierten Wichtungen auf Handlingkurs

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein modellprädiktiver Regler zur Querführung automatisierter Fahrzeuge aufgebaut, die Auswirkungen unterschiedlicher Prädiktionsmodelle aufgezeigt und eine geschwindigkeitsabhängige Optimierung der Wichtungen des Gütefunktionals durchgeführt. Der Regler zeigt dabei sowohl bei niedrigen Geschwindigkeiten und geringen Kurvenradien als auch bei hochdynamischen Fahrsituationen eine stabile und gleichmäßige Sollwertfolge bei geringer Querabweichung.

Zukünftige Arbeiten werden sich auf eine analytische Stabilitätsbetrachtung des geschlossenen Regelkreises konzentrieren, als auch die Wechselwirkungen zwischen Führungsverhalten und Fahrkomfort näher untersuchen.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literatur

[1] T. Keviczky, P. Falcone, F. Borrelli, J. Asgari und D. Hrovat, “Predictive Control Approach to Autonomous Vehicle Steering“, American Control Conference, S. 4670 – 4675, 2006.

[2] A. Katriniok und D. Abel, “LTV-MPC Approach for Lateral Vehicle Guidance by Front Steering at Limits of Vehicle Dynamics”, IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), S. 6828 – 6833, 2011.

[3] V. Turri, A. Carvalho, H. E. Tseng, K. H. Johansson, F. Borrelli, “Linear Model Predictive Control for Lane Keeping and Obstacle Avoidance on Low Curvature Roads“, IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), S. 378 – 383, 2013.

[4] M. Mitschke und H. Wallentowitz, Dynamik der Kraftfahrzeuge, Springer Verlag, Berlin, 2014.

[5] V. Govender und S. Müller, “Modelling and Position Control of an Electric Power Steering System”, 8th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control AAC 2016 Norrköping, 49(11), S. 312 – 318, 2016.

[6] J. Lunze, Regelungstechnik 2, Springer Verlag, Berlin, 2014.

[7] J. M. Maciejowski, Predictive Control with Constraints, Pearson, 2002.

[8] E. F. Camacho und C. Bordons, Model Predictive Control, Springer Verlag, London, 2007.

[9] R. Isermann, Fahrdynamik-Regelung, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2006.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Optimierte Auslegung von Antriebssträngen mittels der FKFS-Triebstrangbibliothek

Vorstellung der FKFS-Triebstrangbibliothek und der Kopplung mit dem MO-CMA-ES an der Auslegung eines Elektrofahrzeuges

André Ebel, M.Sc., Dipl.-Ing. **Markus Orner**, Dr.-Ing. **Thomas Riemer**, Prof. Dr.-Ing. **Hans-Christian Reuss**, Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), Stuttgart

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, das am FKFS über die Jahre im Rahmen diverser Projekte erarbeitete Wissen zur Modellierung und Simulation von Antriebssträngen in einer Triebstrangbibliothek zusammenzufassen. Mittels einer am FKFS entwickelten Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung können eine Vielzahl an Antriebsstrangtopologien schnell und strukturiert modelliert werden. Eine Anwendungsmöglichkeit der Triebstrangbibliothek ist die Optimierung von Antriebssträngen. Dafür wurde diese um den multikriteriellen Algorithmus MO-CMA-ES erweitert. Der Aufbau der Triebstrangbibliothek und die Kopplung mit dem MO-CMA-ES werden anhand der Auslegung eines Elektrofahrzeuges auf die Zielgrößen Reichweite und Batteriekosten vorgestellt.

Abstract

In this paper we present an approach to combine the knowledge that has been generated through the years within several projects at FKFS in the field of modelling and simulation of powertrains within a drivetrain-library. A vehicle simulation environment, developed at FKFS, allows the fast and organised modelling of a variety of drivetrain topologies. One application of the drivetrain-library is the optimisation of powertrains. For this purpose, the drivetrain-library was extended by the multi-criterial algorithm MO-CMA-ES. The structure of the drivetrain-library and the linkage with the MO-CMA-ES is presented by means of the design of an electric vehicle regarding the target values range and battery costs.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1. Einleitung

Das Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) beschäftigt sich seit rund 15 Jahren mit der Elektrifizierung des Kraftfahrzeuges. In Kooperation mit dem IVK (Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen) der Universität Stuttgart sind seitdem zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten auf den Gebieten Hybridantriebe [1] und batterieelektrische Fahrzeuge [2] entstanden. In diesem Paper wird ein Ansatz vorgestellt, das vorhandene Wissen in einer Bibliothek zusammenzufassen und dem Anwender ein Werkzeug zur Simulation von Antriebssträngen zur Verfügung zu stellen. Erweitert wurde die Bibliothek um den evolutionären Algorithmus „Multi-Objective Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy“ (MO-CMA-ES) zur multikriteriellen Optimierung der Antriebsstränge. Die Arbeiten zu diesem Paper entstanden im Rahmen des Forschungsprojektes eMERGE II, gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

2. Aufbau der FKFS-Triebstrangbibliothek

Die FKFS–Triebstrangbibliothek besteht aus einer in Matlab/Simulink integrierten Modellbibliothek und einer speziell auf die heutige Vielzahl an Antriebsstrangtopologien ausgelegten Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung. Der Aufbau der Simulationsumgebung erlaubt durch die modulare Struktur eine Vielzahl von Antriebsstrangkonfigurationen, die im Abschnitt 2.1 näher erläutert werden.

Mittels einer strikten Trennung von Komponentenmodellen und Parametersätzen sind eine einfache Wiederverwendung der Modelle und ein projektübergreifender Einsatz möglich. Durch unterschiedliche Komponentenmodelle können verschiedene Modellierungstiefen (z.B. Kennfeld oder detaillierte physikalische Modellierung) und unterschiedliche Technologien (z.B. Asynchron- & Synchronmaschinen) abgedeckt werden.

Die fahrzeugspezifischen Parameter der jeweiligen Komponenten werden durch jeweils unterschiedliche Parametersätze realisiert. Dadurch ist es möglich Fahrzeuge von Kleinstwagen bis zu Oberklassefahrzeugen mit den gleichen Komponentenmodellen nur durch unterschiedliche Parametersätze zu erzeugen und zu simulieren. Aktuell liegen in der Triebstrangbibliothek, die ständig erweitert wird, über 65 verschiedene Komponentenmodelle und über 130 dazugehörige Parametersätze vor.

Die Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung, in Bild 1 aufgezeigt, ist als Vorwärtssimulation aufgebaut, bei der ein Fahrermodell die Aufgabe der Geschwindigkeitsregelung auf die vorgegebene Sollgeschwindigkeit übernimmt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

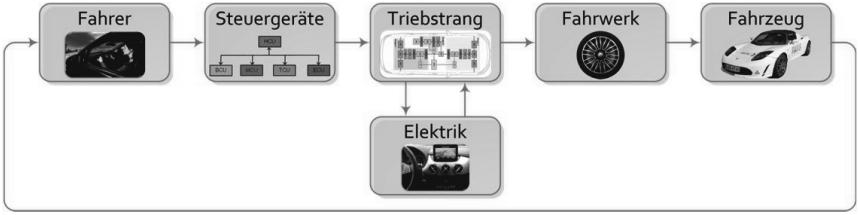


Bild 1: Regelungsstruktur der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung

Die Triebstrangbibliothek basiert nur auf Simulink-eigenen Funktionalitäten, die so umgesetzt sind, dass Anwender mit Simulink-Kenntnissen schnell mit der Triebstrangbibliothek arbeiten und neue Fahrzeugmodelle aufbauen können.
Der Aufbau der Gesamtstruktur ist für Simulation, Workspace-Parameter, Modellablage und Parameterdaten konsistent und ermöglicht so eine einfache Handhabung.

2.1 Mögliche Antriebsstrangkonfigurationen

Die Gesamttopologie, die alle einsetzbaren Komponenten beinhaltet, ist in Bild 2 dargestellt. Sinnvolle Antriebsstrangtopologien entstehen, indem nicht benötigte Komponenten mit sogenannten Leermodellen bedatet werden, die je nach Komponente die Signale unverändert weitergeben oder den Signalfluss unterbrechen. Zum Beispiel wird bei einer nicht verbauten E-Maschine das Drehmoment und die Drehzahl an die nächste Komponente durchgeschleift.
Je nach Verwendung der verschiedenen Gruppen können Vorder- und Hinterrad, sowie Allradantriebe realisiert werden. Das Verteilergetriebe dient dabei entweder als Leermodell, das nur den Signalfluss an Vorder- bzw. Hinterachse leitet, als Differentialgetriebe oder auch als Planetengetriebe zur Dar-

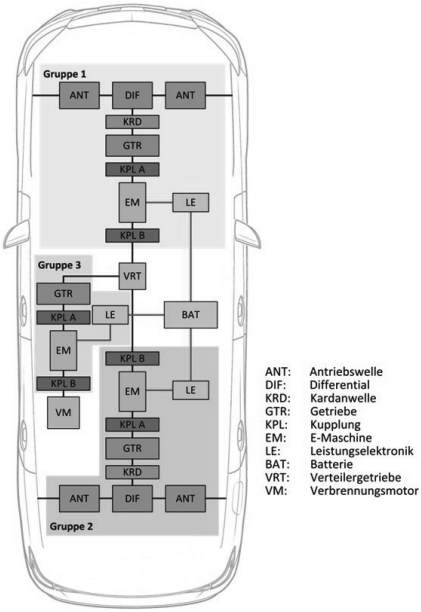


Bild 2: Gesamttopologie der FKFS-Triebstrangbibliothek

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

stellung eines leistungsverzweigten Hybrids. Neben rein konventionellen Verbrennungsmotorantrieben (VM) und batterieelektrischen Antrieben (BEV), können auch serielle und parallele Hybridantriebe, sowie verschiedene Axle-Split Topologien umgesetzt werden.
Die Vielzahl der darstellbaren Topologien erfordert ein hohes Maß an Flexibilität bei der Steuerung der Antriebskomponenten. Um einen möglichst intuitiven Aufbau umsetzen und Fragestellungen der virtuellen Applikation bearbeiten zu können, ist die Struktur der Steuerung an der Struktur realer Steuergeräte im Fahrzeug orientiert, wie in Bild 3 zu sehen. Bei Hybridantrieben erfolgt das Management der Einzelkomponenten in der Hybridsteuerung (HCU) [3]. Diese wurde für eine schnelle und flexible Parametrierung entwickelt und ist in der Lage unterschiedliche Hybridtopologien darzustellen. Wird nur eine Antriebsmaschine verwendet, wird der Signalfluss von der HCU direkt an die entsprechende Motorsteuereinheit (MCU/ECU) weitergeleitet, die die Kommunikation mit den Komponenten übernimmt.

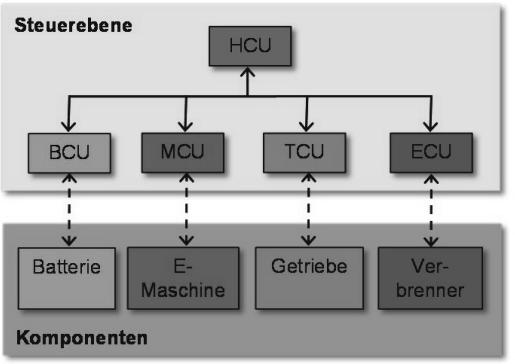


Bild 3: Kommunikationsstruktur zwischen Steuergeräte- und Komponentenebene

2.2 Möglichkeit der Modelleinbindung mittels vordefinierten und frei wählbaren Schnittstellen

Eine Kernfrage beim Aufbau einer universellen Modellbibliothek ist die Definition der Schnittstellen zwischen den Modellen. Im Fall der FKFS-Triebstrangbibliothek ist die Schnittstelle gemäß Bild 4 umgesetzt und berücksichtigt folgende Punkte:

- Eine Komponente kann an verschiedenen Stellen in der Gesamtsimulation platziert werden, z.B. kann ein Getriebe in Gruppe 1, 2 oder 3 verbaut sein. Es ist daher in der Gesamtsimulationsumgebung eine Schnittstelle nötig, die die Signale der Vorgänger und Nachfolgemodelle aus der richtigen Gruppe extrahiert und in eine positionsunabhängige Benennung umwandelt. Diese Umwandlung ist auch auf der Ausgangsseite

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

des Komponentenmodells nötig. Dies führt zu einer Schnittstelle auf Ebene der Gesamtsimulation.

- Um die funktionalen Elemente der Komponentenmodelle in Simulink übersichtlich darstellen zu können und vorhandene Modelle schnell in die Triebstrangbibliothek einzubinden, ist innerhalb des Komponentenmodells ebenfalls eine Ein- und Ausgangsschnittstelle vorhanden.
- Die Signale die aus dem Komponentenmodell in die Gesamtsimulationsumgebung übergeben werden, müssen in jedem Modell der Komponente vorhanden sein, um jederzeit eine lauffähige Simulation zu haben. Falls Signale im Komponentenmodell z.B. wegen unterschiedlichen Modellierungstiefen nicht berechnet werden, wird ein eindeutiger Defaultwert für dieses Signal gesetzt. Dies verhindert, dass andere Komponenten unbemerkt dieses Signal verwenden und fehlerhafte Ergebnisse berechnen.
- Die Ausgangsschnittstelle der Gesamtstruktur wird inklusive der Signalumbenennung automatisiert erzeugt, um eine einfache Erweiterung der Schnittstelle zu ermöglichen.

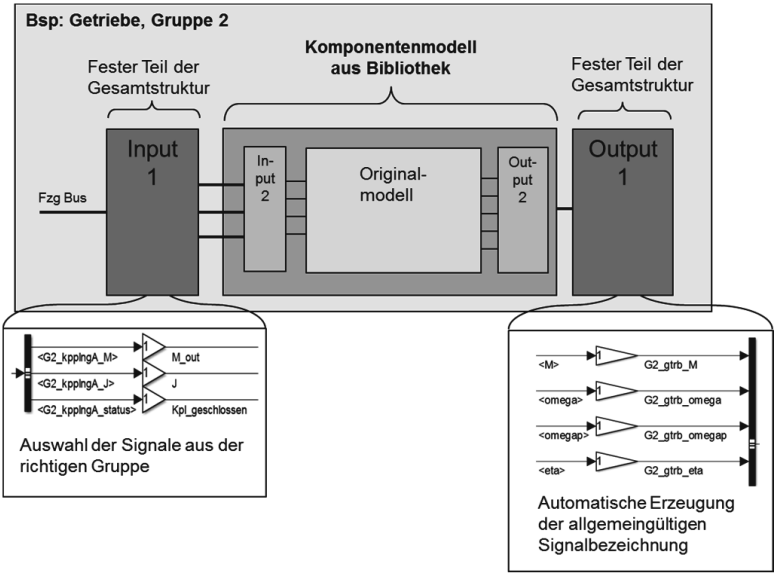


Bild 4: Aufbau der Schnittstelle zwischen Gesamtstruktur und Komponentenmodell

Um vorhandene Komponentenmodelle einfach in die FKFS-Triebstrangbibliothek übernehmen zu können, werden für die Komponentenmodelle maskierte Workspaces eingesetzt. Die

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

entsprechenden Parameter sind im Matlab-Structure-Format abgelegt und werden vor Beginn der Simulation automatisiert umbenannt und in den maskierten Workspace kopiert.

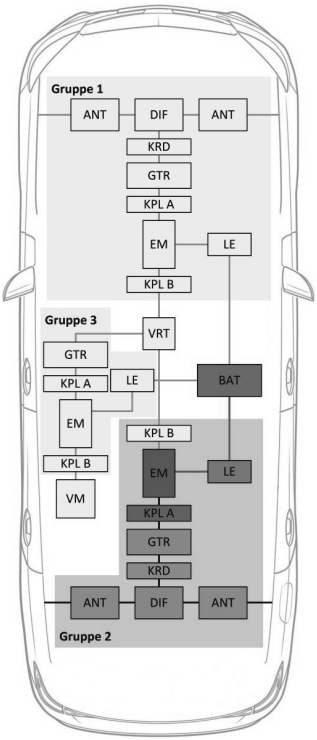
Die Bezeichnung der Signalnamen in der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung folgt eindeutigen Namenskonventionen zur schnellen Zuordnung und einfachen Lesbarkeit.

2.3 Aufbau des Elektrofahrzeug Antriebsstrangs

Für die Darstellung der Funktionalität der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung und des angekoppelten Optimierers, wird in diesem Paper ein beispielhaftes Elektrofahrzeug mit Hinterradantrieb ausgelegt. In Abbildung 5 sind die bedateten Modelle farbig und die Leermodelle in grau dargestellt. Aufgrund des Hinterradantriebes werden ausschließlich Komponenten der Gruppe 2 im Triebstrang verwendet. Die Fahrzeugparameter, die als Grundlage dienen, sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Fahrzeugparameter

Parameter	Wert
Länge [mm]	4676
Breite [mm]	1885
Höhe [mm]	1435
Radstand [mm]	2870
A_{Stirn} [m²]	2,16
c_w-Wert [-]	0,21
Antrieb	Hinterradantrieb
Bereifung/Räder vorn	235/35 R 20
Bereifung/Räder hinten	275/30 R 20



Antriebsstrang

Als Zyklus für die folgende Optimierung wird der Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP) Klasse 3 gewählt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3. Anwendung eines multikriteriellen Optimierers

An die Optimierung heutiger Antriebsstränge werden unterschiedliche Anforderungen gestellt. Einerseits sollen mehrere, reelle Parameter variiert werden, beispielsweise die Getriebeübersetzungen, Leistungsdaten der Antriebsmaschine, sowie die Größe und Verschaltung des Traktionsenergiespeichers. Der Suchraum der Parameter ist zudem über Randbedingungen eingeschränkt. Andererseits soll die Optimierung hinsichtlich mehrerer Zielgrößen geschehen, beispielsweise den Kosten, dem Energieverbrauch, als auch der Reichweite elektrischer Antriebsstränge.

Aus diesen Gründen wurden die Anforderungen der nichtlinearen, multikriteriellen Optimierung für mehrere, reelle Parameter mit Randbedingungen definiert und der Evolutionäre Algorithmus MO-CMA-ES als Optimierer ausgewählt.

3.1 Der Evolutionäre Algorithmus MO-CMA-ES

Der Algorithmus MO-CMA-ES nach [4] ist eine Erweiterung des einkriteriellen, elitären (1+λ)-CMA-ES für reellwertige, multikriterielle Optimierungen. Beim (1+λ)-CMA-ES erzeugt ein Elternindividuum λ Nachkommen mittels einer mehrdimensionalen Normalverteilung. Durch die Anpassung der Kovarianzmatrix und der damit erzeugten neuen Population findet die Optimierung hin zum globalen Optimum statt, dargestellt in Bild 6 für zwei Parameter. Der Parametersatz der Nachkommen wird innerhalb einer Fitnessfunktion ausgewertet und das Ergebnis der Zielgröße zurückgegeben. Die (1+λ)-Selektion zur Bestimmung der neuen Elterngeneration auf Basis der Zielgröße beim einkriteriellen (1+λ)-CMA-ES muss für die multikriterielle Optimierung um entsprechende Selektionskriterien für mehrere Zielgrößen erweitert werden. Zudem ist es möglich mehrere Elternindividuen λ_{MO} für die multikriterielle Optimierung zu bedaten.

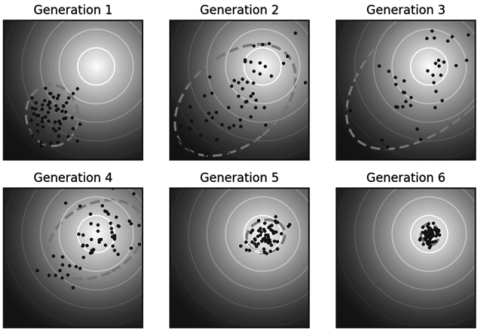


Bild 6: Beispieloptimierung des einkriteriellen CMA-ES über 6 Generationen [5]

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In diesem Paper wird die Selektion im MO-CMA-ES mittels der Sortierkriterien Non-dominated Sorting und dem verteilten Hypervolumen realisiert. Die Anpassung der Schrittweite auf Grundlage eines erfolgreichen Nachkommen ist nach [6] realisiert. Sind Randbedingungen für die zu optimierenden Parameter gegeben und werden diese Überschritten, so wird nach [7] vorgegangen. Der Parameterwert wird auf den Wert der nächstgelegenen Randbedingung gesetzt und in Abhängigkeit der Distanz zwischen dem Parameterwert und dem Wert der Randbedingung wird ein Straffaktor auf das Ergebnis der Zielgrößen addiert.

3.2 Validierung des implementierten Optimierers MO-CMA-ES

Zur Bestimmung der Güte des implementierten Algorithmus MO-CMA-ES wurde dieser mittels mathematischen Testfunktionen nach [8] untersucht. Es handelt sich dabei um Standard Benchmark Probleme mit Randbedingungen, die zu minimieren sind. Die Ergebnisse für die Testfunktionen ZDT1, ZDT2 und ZDT3 mit den Kriterien f_1 und f_2 sind in Bild 7 dargestellt.

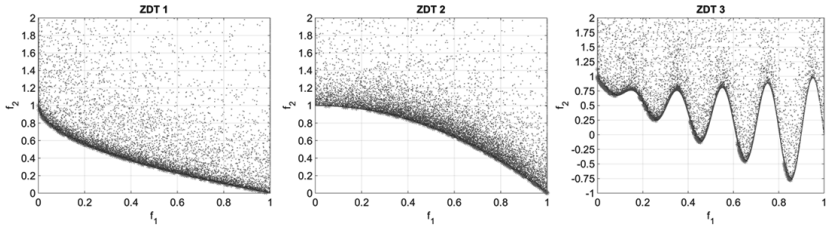


Bild 7: Ergebnisse der Validierung des implementierten MO-CMA-ES (blaue Punkte: alle getesteten Lösungen, rote Sterne: Lösungen der letzten Generation)

Zur Validierung der Ergebnisse wurde das Hypervolumen zu einem definierten Referenzpunkt berechnet und mit Ergebnissen von [9] verglichen. In [9] wurde das maximale Hypervolumen für die Benchmark Probleme auf Grundlage einer optimalen Verteilung bestimmt. In Tabelle **2** aufgelistet ist ersichtlich, dass der implementierte Algorithmus MO-CMA-ES eine hohe Güte mit einem maximalen Fehler von 0,39 % aufweist. Der Fehler beim ZDT2 liegt an der nicht gleichverteilten Pareto-Front, aufgrund der geringen Anzahl Punkte. Bei einer höheren Anzahl Punkte ist die Abweichung vernachlässigbar. Dies zeigt, dass die Pareto-Front exakt und gleichverteilt ermittelt werden konnte.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 2: Ergebnisse der Validierung des implementierten MO-CMA-ES

Funktion	Hypervolumen	Anzahl Punkte	ETH-SOP	Abweichung
ZDT1 – 1T	120,5683	100	120,6621	0,078 %
ZDT1 – 100T	120,6651	5379	120,6662	0,00091 %
ZDT2 – 1T	119,8588	100	120,3289	0,39 %
ZDT2 – 100T	120,3326	5304	120,3328	0,00017 %
ZDT3 – 1T	128,7735	100	128,7760	0,0019 %
ZDT3 – 100T	128,7774	4397	128,7777	0,00023 %

4 Kopplung von Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung und MO-CMA-ES

Die Kopplung der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung mit dem Optimierer wird mittels eines zweistufigen Prozesses realisiert. Im ersten Schritt findet ein Preprocessing statt. Es werden die Randbedingungen der zu variierenden Antriebsstrangparameter anhand von Vorgaben (Höchstgeschwindigkeit, Steigfähigkeit, Beschleunigungszeit) berechnet. Die Bestimmung der Randbedingungen dient der Eingrenzung des Suchraumes für die folgende Optimierung.

Im zweiten Schritt findet die Optimierung mittels des Algorithmus MO-CMA-ES statt. Die Gesamtfahrzeugsimulation ist innerhalb der Fitnessfunktion des Optimierers eingebettet. In der Fitnessfunktion werden die variierten Antriebsstrangparameter der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung übergeben und die Simulation gestartet. Abschließend werden die definierten Zielgrößen bestimmt und dem Optimierer als Minimierungsproblem zurückgegeben.

4.1 Ermittlung der Randbedingungen für die zu optimierenden Antriebsstrangparameter

Das Preprocessing ist die analytische Berechnung der Randbedingungen der Antriebsstrangparameter. Neben den in Tabelle 1 aufgelisteten Fahrzeugparametern dienen insbesondere die Performance-Anforderungen aus Tabelle 3 als Grundlage der Berechnungen.

Es wird das minimal benötigte Moment auf Basis der geforderten Steigung, sowie die maximale Drehzahl auf Basis der geforderten Höchstgeschwindigkeit am Rad berechnet. Weiterhin wird die benötigte Leistung zur Bewältigung der geforderten Beschleunigungszeit, der geforderten Dauergeschwindigkeit bei 15 % Steigung und der geforderten Höchstgeschwindigkeit berechnet. Die Berechnung der benötigten Leistung für die geforderte Beschleunigungszeit wird nach [10] durchgeführt. Dabei hat das Verhältnis der E-Maschinen-Maximaldrehzahl zur Nenndrehzahl einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Ergebnis.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tabelle 3: Performance Anforderungen

Parameter	Wert
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	180
Dauergeschwindigkeit bei 15 % Steigung [km/h]	100
Maximale Steigung [%]	50
Beschleunigungszeit 0-100 km/h [s]	5,9

Für die Auslegung des Elektrofahrzeuges werden die Anzahl serieller und paralleler Batteriezellen so variiert, dass sich die Batteriespannung im Bereich 320–420 V befindet. Die weiteren Antriebsstrangparameter sind die Leistung, das Drehmoment und die Drehzahl der E-Maschine, die sich aus den ermittelten Größen am Rad berechnen und die Getriebeübersetzung. Nach der Berechnung und Festlegung der Start- und Grenzwerte werden die Parameter dem Algorithmus MO-CMA-ES über einen Funktionsaufruf übergeben.

4.2 Optimierung der Antriebsstrangparameter

Der Algorithmus MO-CMA-ES wurde für die Optimierung des Elektrofahrzeuges so bedatet, dass 100 Elternindividuen λ_{MO} jeweils ein Nachkommen erzeugen. Dies entspricht dem 100x(1+1)-MO-CMA-ES. Weiterhin wurden Abbruchkriterien definiert, die die Optimierung beenden sofern das Optimum gefunden ist, oder eine freiwählbare Anzahl von Funktionsaufrufen erfolgt ist (in diesem Beispiel 50.000). Beim Funktionsaufruf wird der auf Grundlage des Elternindividuums erzeugte Antriebsstrangparametersatz des Nachkommens an die Fitnessfunktion übergeben.

Die Fitnessfunktion stellt die Schnittstelle zwischen dem Optimieralgorithmus und der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung dar. Die variierten Antriebsstrangparameter, sowie von diesen Parametern abhängige Antriebsstranggrößen werden der Simulation übergeben und die Simulation wird gestartet. Für die Auslegung des Elektrofahrzeuges wird als Zyklus der WLTP verwendet und als Ergebnis der Simulation die benötigte Energie aus der Batterie an die Fitnessfunktion übergeben. Aus der benötigten Energie und der Zykluslänge wird der Verbrauch des Antriebsstranges ermittelt. Mittels der verfügbaren Energie der Batterie aufgrund der seriellen und parallelen Zellen und dem Verbrauch wird die mögliche Reichweite abgeschätzt. Die Reichweite ist die erste Zielgröße der Optimierung. Da es sich bei dem gewählten Algorithmus MO-CMA-ES um ein Minimierungsproblem handelt, wird die Reichweite negiert. Die zweite Zielgröße sind die Batteriekosten. Diese berechnen sich ebenfalls aus der verfügbaren Energie der Batterie und der Annahme eines Kostensatzes von 190 $/kWh.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Da aufgrund der Variation der Antriebsstrangparameter die Performance-Anforderungen aus Tabelle 3 in bestimmten Konstellationen nicht erfüllt werden, findet eine Überprüfung bezüglich der Beschleunigungszeit, Höchstgeschwindigkeit und Steigfähigkeit statt. Wird eine Anforderung nicht erfüllt, so wird ein Straffaktor, gleich dem Überschreiten von Randbedingungen von Antriebsstrangparameter in Kapitel 3.1, addiert. Anschließend werden die beiden Zielgrößen Reichweite und Batteriekosten dem Algorithmus MO-CMA-ES übergeben.

5. Ergebnisse

Für das in Kapitel 2.3 aufgebaute Elektrofahrzeug, sowie den in Kapitel 4.1 genannten Antriebsstrangparametern, die im Bereich der berechneten Randbedingungen variiert wurden, ist in Bild 8 der Lösungsraum für die Zielgrößen der Batteriekosten gegenüber der Reichweite dargestellt.

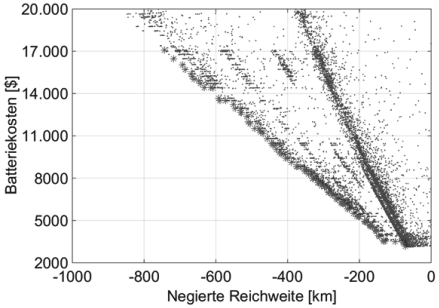


Bild 8: Ergebnis der Elektrofahrzeug Optimierung (blaue Punkte: alle getesteten Lösungen, rote Sterne: Lösungen der letzten Generation)

Es konnten Pareto-optimale Lösungen gefunden werden, wobei jede Lösung einem Satz Antriebsstrangparameter entspricht. Für eine beispielsweise geforderte Reichweite von 345 km entstehen Batteriekosten von 8500 $. Diese Antriebskonfiguration hat eine Batterie mit einem Energieinhalt von 44,7 kWh, eine E-Maschinenleistung von 224 kW bei einem Drehmoment von 420 Nm und einer Drehzahl von 20.000 U/min.

6. Fazit

Die FKFS-Triebstrangbibliothek mit der vorgestellten Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung ist ein Werkzeug, um eine Vielzahl von Antriebsstrangtopologien schnell und strukturiert zu modellieren und simulieren. Mittels der Kopplung mit dem evolutionären Algorithmus MO-CMA-ES ist es möglich die modellierten Antriebsstränge hinsichtlich mehrerer Zielgrößen zu

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

optimieren. Durch die Methode des zweistufigen Prozesses werden der Suchraum des Optimierers eingegrenzt und Performance-Anforderungen des Antriebsstranges berücksichtigt. Dem FKFS steht somit ein Werkzeug zur Verfügung um sehr schnell verschiedenste Antriebsstrangtopologien simulativ nachzubilden und hinsichtlich verschiedenster Parameter und Zielgrößen zu optimieren.

Literaturverzeichnis

[1] Riemer, T.: Vorausschauende Betriebsstrategie für ein Erdgashybridfahrzeug, Universität Stuttgart: expert Verlag, 2012.

[2] Orner, M., Riemer, T. und Reuss H.-C.: „Modulare Auslegung elektrischer Antriebsstränge unter Berücksichtigung von Reichweitenanforderungen," in International Stuttgart Symposium, Stuttgart, 2016.

[3] Keilhoff, D.: Ein methodischer Ansatz zur Erstellung von Hybrid-Betriebsstrategien für die simulative Ermittlung von Lastkollektiven, Springer Vieweg, 2016.

[4] Igel, C., Hansen, N. und Roth, S.: „Covariance Matrix Adaption for Multi-objective Optimization," Evolutionary Computation, vol. 15, no. 1, pp. 1-28, März 2007.

[5] Glass, C. W.: Modellierung, Simulation und Optimierung II, Vorlesungsskript, Stuttgart: Institut für Höchstleistungsrechnen, 2015.

[6] Voß, T., Hansen, N. und Igel, C.: „Improved Step Size Adaptation for the MO-CMA-ES," GECCO '10: Proceedings of the 12th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, pp. 487-494, Juli 2010.

[7] Hansen, N.: „The CMA Evolution Strategy: A Tutorial," 04 April 2016. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1604.00772.pdf. [Zugriff am 17 Mai 2016].

[8] Zitzler, E., Thiele, L. und Kalyanmoy, D.: „Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results," Evolutionary Computation, vol. 8, no. 2, pp. 173-195, Juni 2000.

[9] „Systems Optimization," Institut TIK, ETH Zürich, Oktober 2009. [Online]. Available: http://people.ee.ethz.ch/~sop/download/supplementary/testproblems/ . [Zugriff am 06 09 2016].

[10] Ehsani, M., Gao, Y. und Emadi, A.: Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. Boca Raton: CRC Press, 2009.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Gaming trifft Automotive

Umweltsimulation zur Absicherung von Fahrerassistenzfunktionen

M.Sc. **Sebastian Wolter**, M.Eng. **Sascha Kerkmann**,
ITK Engineering GmbH

Kurzfassung

Die Entwicklung bildverarbeitender Fahrerassistenzsysteme ist aufgrund ihrer Komplexität, Vernetzung untereinander und der hohen Sicherheitsanforderungen sehr kosten- und zeitintensiv. Somit spielt das Testen und auch schon die virtuelle Absicherung solcher Systeme eine wichtige Rolle, um den kürzer werdenden Entwicklungszyklen und dem hohen Kostendruck gerecht zu werden. Um virtuelle Absicherung bereits aus Sicht der Sensorik zu verwirklichen, ist eine realitätsnahe Simulation der Umwelt notwendig. Im folgendem wird eine Umsetzung der Absicherung von Sensorik in einem geometrisch realitätsnahen Umfeld auf Basis etablierter Technologien aus der Gaming-Industrie vorgestellt.

Der Ansatz verwendet detaillierte 3D Meshes[1] von Umgebungsobjekten, um mit Hilfe von physikalischen Simulationsmodellen effizient Sensorsignale nachbilden zu können und somit eine ganzheitliche Umweltsimulation zu bieten.

Diese Lösung aus der Gaming-Industrie zeichnet sich heute schon durch Ihre hohe Leistungsfähigkeit aus. Kurze Entwicklungszyklen in der Konsumentenelektronik ermöglichen flexible Erweiterung auf Basis des jeweiligen Stands der Technik bei vergleichsweise günstigen Anschaffungskosten.

1. Simulation vs. Realität am Beispiel von Ultraschallsensoren

Umweltsimulationen sind notwendig, damit der Sensorik des virtuellen Fahrzeugs und dem Fahrzeugdynamikmodell realistische Eingabedaten zur Verfügung gestellt werden können. Da die Parameter der Umweltsimulation anpassbar sind, können hieraus eine Vielzahl von Testszenarien zur virtuellen Absicherung erstellt werden. Besonders mit Blick auf das autonome Fahren ist hierbei eine sehr hohe Simulationsgüte erwünscht. Allerdings zeigen Vergleiche zwischen Fahrzeugtests und Simulation Abweichungen. Besonders bei Ultraschall-Sensorsimulation sind bisherige Ansätze zu sehr idealisiert und haben zu wenig mit der

[1] Aus Dreiecksdaten bestehendes Modell, oft verwendet für Animation.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Wirklichkeit zu tun. Oft werden komplexe Objekte wie Fahrzeuge durch sogenannte Bounding Boxes[2], also einfache einhüllende Geometrien, repräsentiert. Die Sensorsimulation verwendet also nicht die tatsächliche Geometrie (Dreiecksnetze) und Oberflächenbeschaffenheit des Objektes. Dies war bisher auch technisch zu aufwendig.

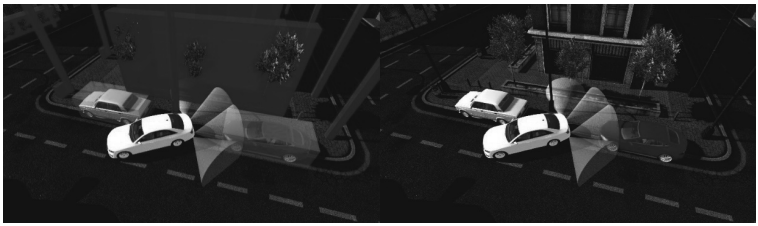


Bild 1: Bounding Boxes (links), Reale Geometrie (rechts)[3]

Ultraschallsensoren werden mit einem Sichtfenster versehen, in dem sie Objekte detektieren können. Die vom Sensor erfasste Distanz wird dann mittels Kegelschnitt des Sichtfensters und der Bounding Box der Objekte berechnet. Durch die Differenz zwischen Bounding Box und realer Kontur des Objektes wird die Distanz in vielen Fällen erheblich verfälscht. Zudem gehen jegliche Informationen über den Auftreffwinkel auf die Geometrie des Objektes verloren bzw. stehen nicht zur Verfügung. Diese spielen jedoch eine große Rolle, da aktive Sensoren wie z.B. Ultraschallsensoren, auf ein zum Sensor zurück reflektiertes Signal angewiesen sind. Oft wird einfach nur die kürzeste Distanz zwischen den Objekten berechnet ohne Reflektionen zu berücksichtigen. Solch eine zunehmend realistische Abbildung der Realität erfordert allerdings einen erhöhten Rechenaufwand zur Simulationszeit, was den Einsatz besonders leistungsfähiger Plattformen erfordert.

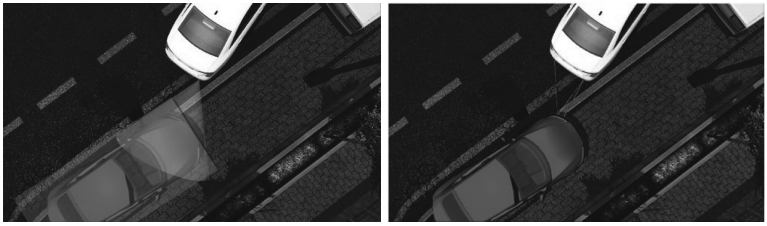


Bild 2 : Differenz Kegelschnitt und Schnitt mit realer Geometrie mit Schnittnormalen[3]

[2] Viereckige Box, die die Geometrie komplett umschließt.

[3] © ITK Engineering GmbH

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2. Systemüberblick der Simulationsumgebung

Die im Folgenden beschriebene Umweltsimulation wird auf einem gängigen PC mit leistungsstarker Grafikkarte (GPU) ausgeführt. Eine GPU bietet die Möglichkeit Berechnungen zu parallelisieren und den Hauptrechenkern (CPU) zu entlasten. Mit Erweiterungskarten für den PC mit beliebigen Schnittstellen (CAN, USB, Ethernet, …) ist eine Anbindung an eine Fahrdynamiksimulation in SiL- wie im HiL-Betrieb möglich. Über die Schnittstellen erhält die Umweltsimulation aktuelle Fahrzeugpositionsdaten. Die Simulationsumgebung wird dabei in einer 3D Engine realisiert. Dabei wird die Engine benutzt um die Geometriedaten zu manipulieren und dient als Schnittstelle zum Austausch von Daten mit der GPU. Hier wird das aus dem Gaming-Sektor und der Filmindustrie bekannte Raytracing–Verfahren verwendet. Dieses Verfahren ist Grundlage für die Umweltsimulation und die Sensorsignalgenerierung für den Einparkassistenten.

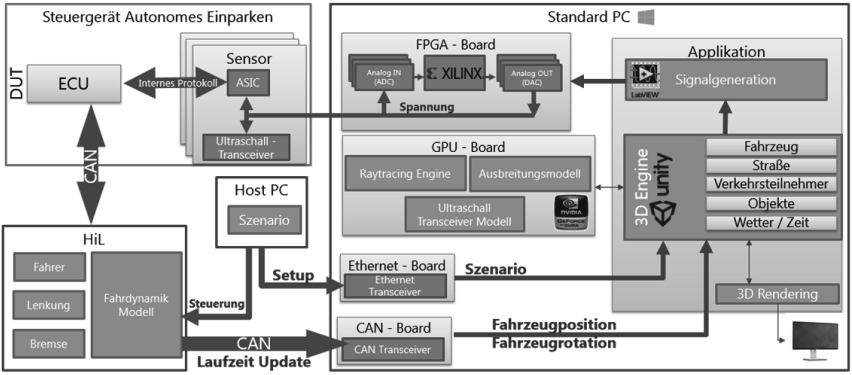


Bild 3: Systemübersicht[4]

3. Komponenten und Technologien

Computerspiele sind in den letzten Jahren immer größer, fotorealistischer mit höheren Auflösungen und höheren Bildraten geworden. Besonders in der neusten Zeit mit Aufkommen von 4K[5] und VR[6] werden neue Herausforderungen an Consumer-Prozessoren und Grafikkarten gesetzt. Diese Entwicklung ist auch für den Automotive-Bereich interessant, da nun die Fä-

[4] © ITK Engineering GmbH

[5] Videoformat mit einer Auflösung von 3840 x 2160 Pixel.

[6] Virtual Reality: Projektion physikalischer Bewegung in eine computergenerierte Umgebung

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

higkeit zu Parallel Computing von Grafikchipsätzen für Embedded Plattformen zur Verfügung stehen.
NVIDIA bietet mit ihrem Programmier - Framework CUDA eine C-ähnliche High-Performance-Programming-API an.
Realistische 3D Szenen müssen naturgemäß sehr detailreich sein. Allein zur Gestaltung von Fahrzeugen in Computerspielen wie „Project CARS“ werden mehr als 300.000 Dreiecke verwendet. Ganze Szenen benötigen somit mehrere Millionen Dreiecke. Simulationsumgebungen für das autonome Fahren werden in Zukunft ähnlichen Ansprüchen genügen müssen. Um diese Menge an Dreiecken möglichst effizient zu verarbeiten, bedarf es neben leistungsfähiger Hardware auch einer leistungsfähigen 3D Engine – eine Middleware, welche für die reine grafische Darstellung und Manipulation der 3D Szene zuständig ist. Diese bietet eine hohe Darstellungsqualität bezogen auf rein visuelle Effekte wie Beleuchtung, Schatten, Reflexionen etc. Aufgrund hoher Benutzerfreundlichkeit, Erweiterbarkeit, Plattform- und Peripheriekompatibilität wird für die Umweltsimulation die weit verbreitete Unity3D Engine verwendet.

4. Raytracing und Rendering zur Bildgenerierung

Kernstück der Umweltsimulation ist neben der 3D Engine zur Darstellung der Umgebung ein Raytracing Algorithmus zur Simulation der Ultraschall - Wellenausbreitung.
Das Raytracing-Verfahren basiert auf der geometrischen Optik, bei der Licht als Gruppe von Strahlen gesehen wird. Das Verfahren selbst ist schon über 50 Jahre alt [1]. Der Hauptanwendungszweck des Raytracing ist die Erstellung von fotorealistischen Bildern, insbesondere Spiegelungen werden hier sehr gut abgebildet.
Die Datengrundlage bildet eine 3D Umgebung. Diese besteht aus 3D Objekten, welche durch eine Vielzahl mathematischer Primitive wie Dreiecke approximiert werden. Andere Objekte wie ideale Kugeln können auch direkt durch mathematische Beschreibungen integriert werden und müssen nicht durch Dreiecke approximiert werden.
Beim eigentlichen Raytracing Schritt werden nun viele Strahlen konstruiert. Beim sog. Rendering ist der Ursprung der Strahlen die Kameraposition, die Richtungen ergeben sich durch ein virtuelles Rechteck, welches dem gewünschten Bildbereich entspricht (siehe Bild 4).

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

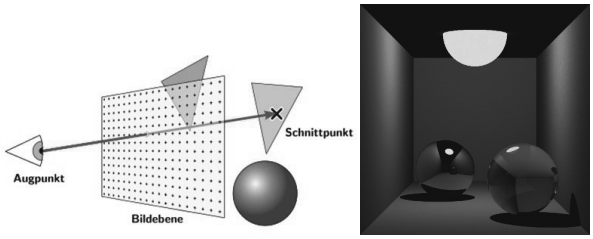


Bild 4: Raytracing Prinzip (links), Rendering Beispiel (rechts) [2]

Nun wird für jeden Strahl bestimmt, welches Objekt am nächsten ist. Dies geschieht durch eine mathematische Schnittoperation. Nun kennt man für jeden Strahl, welcher wiederum einem Monitorpixel entspricht, aufgrund des getroffenen Objekts die Farbe, die dann angezeigt werden soll. Für fotorealistische Aufnahmen benötigt ein Beleuchtungsmodell, welches in Abhängigkeit des Winkels zwischen der Normalen am Schnittpunkt und der Richtung zu einer Lichtquelle diese Farbe heller oder dunkler berechnet (Shading). Durch Konstruktion weiterer Strahlen kann bestimmt werden, ob ein Objekt im Schatten liegt oder nicht (Schattenstrahlen). Spiegel können realisiert werden, indem an spiegelnden Objekten ein idealer Reflektionsstrahl gebildet wird und erst dann die Farbe des nächsten Objekts verwendet wird (rekursives Raytracing).

Der Vorteil des Verfahrens ist seine Einfachheit. Nachteil ist die erforderliche Rechenleistung, welche proportional zur gewünschten Auflösung und der Komplexität der 3D Szene ist und bei dynamischen Simulationen während der Simulationszeit erforderlich ist.

Durch Beschleunigungsstrukturen in der Softwarearchitektur der Simulation (effiziente Raumaufteilung und Sortierung) können die Anzahl der notwendigen Schnittberechnungen erheblich reduziert werden. Durch Parallelisierung des Algorithmus können mehrere Strahlen gleichzeitig berechnet werden. Als Hardware bietet sich die Verwendung von Grafikkarten an (GPGPU-Programmierung). Getrieben durch Computerspiele- und Filmindustrie wurde die Weiterentwicklung dieser Chipsätze in den vergangenen Jahren deutlich schneller vorangetrieben, als es im Vergleich zu Desktop-Prozessoren der Fall war [2]. Die Grafikkarten selbst besitzen bereits in ihrer Hardware parallelisierte Recheneinheiten (Shader), um für jeden Pixel oder jedes Vertex[7] eine bestimmte Operation parallel ausführen zu können. Seit einigen Jahren können diese parallelen Ausführungseinheiten nun auch für allgemeinere Algorithmen verwendet werden, auch jenseits des Anwendungsfelds Bilderzeugung. Hierbei ha-

[7] Eckpunkt eines Dreiecks im Raum durch einen Ortsvektor beschrieben.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

ben sich mehrere Bibliotheken etabliert. Während OpenCL [3] in heterogenen Hardware-Umgebungen mit einer Vielzahl von Hardware-Komponenten kompatibel ist, bietet die NVIDIA CUDA API [4] aktuell die effizienteste Implementierung für das parallele Rechnen auf (NVIDIA-) Grafikkarten. Bestehende Algorithmen bleiben auch mit zukünftiger Hardware kompatibel und skalieren automatisch mit der steigenden Taktrate, Speicherzugriffsgeschwindigkeit und der Zahl der Shader Kerne.

5. Von fotorealistischen Bildern zu Ultraschall

Im Gegensatz zum üblichen Gebrauch im Rendering lässt sich das Raytracing-Verfahren nicht nur nutzen um sich ausbreitende Lichtstrahlen zu simulieren. In Simulationsumgebungen ist es wichtig ein schnelles Verfahren zu finden, um Ausbreitungsmodelle berechnen zu können. Die Ausbreitung von Wellen lässt sich auf konventionellem Weg (FEM/FV-Verfahren) nur sehr aufwendig berechnen und es ist bisher nicht möglich die Berechnung in Echtzeit zu realisieren. Eine rechenzeiteffiziente Approximation der Wellenausbreitung kann durch das Raytracing-Verfahren berechnet werden, indem die Welle durch eine Vielzahl von Strahlen angenähert wird. Die Anwendung von Ausbreitungsmodellen auf die einzelnen Strahlen lässt sich wesentlich schneller berechnen als auf eine ganze Welle. Die Berechnung einzelner Strahlenverläufe lassen sich zudem gut parallelisieren und somit ist es bei einer Umsetzung auf Grafikkarten realistisch umsetzbar, in einen für diesen Anwendungsfall annehmbaren Echtzeitbereich zu kommen. Somit lassen sich Simulationen für Sensoren erstellen, deren Funktion auf die Detektion von Wellen basieren, beispielsweise die Schallausbreitung von Ultraschall-Sensoren. Dabei werden, wie im Anwendungsfall Rendering, Strahlen von der punktförmigen Sensorquelle (vorher: Kameraposition) in den Raum gestrahlt. Der Unterschied zum Rendering besteht in der Abbruchbedingung. Ziel des Strahles ist hier nicht die Bildebene zum rendern, sondern der Schnitt mit einem Sensor und somit der Empfang der „Welle“ nach mehreren Reflektionen. Zusätzlich lassen sich weitere auf physikalischen Modellen basierende Abbruchbedingungen formulieren.

6. Modellbeschreibung

Damit Ultraschallsensoren auch außerhalb realer Bedingungen getestet werden können, müssen die Sensoren in einem Modell nachgebildet werden. Die Simulation der Ultraschalldistanzmessung erfolgt auf zwei Ebenen. Das physikalische Verhalten der piezoelektrischen Elemente, welche für die Schallausbreitung im Sensor verantwortlich sind, bildet die direkte Schnittstelle zwischen elektrischen Eingangssignal und der Umwandlung in Schallwellen und somit die erste Ebene. Die zweite Stufe ist die Simulation der Ausbreitung der Schallwelle

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

durch das Medium Luft. Hier muss neben der Berechnung der Distanzen zwischen Sensoren und Objekten auch noch ein physikalisches Ausbreitungsmodell betrachtet werden, welches die Dämpfung der Schallleistung bei seiner Ausbreitung im Raum berücksichtigt.
Auf die Bedeutung des Sensormodells wird später eingegangen. An dieser Stelle soll zunächst der Bezug zwischen Ausbreitungsmodell und dem Raytracing-Verfahren erklärt werden.
Das Raytracing-Verfahren liefert eine Vielzahl an Strahlinformationen vom Sensor ausgehend. Die wichtigsten auszulesenden Informationen der Strahlen sind der Ausstrahlwinkel bezogen auf die Sensorrotation, die Strahllänge und die Information über die Eigenschaften, sowie die Normale des getroffenen Objektes.
Die erste wichtige Kenngröße des Sensors ist seine Abstrahlcharakteristik. Diese gibt Auskunft über die Ausgangsleistung, die ein Strahl mit gegebenen Winkel zum Sensor besitzt.

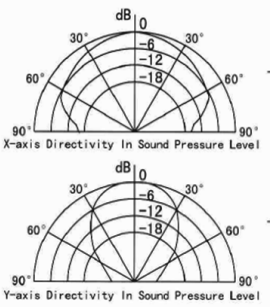


Bild 5: Winkelabhängige Dämpfung (Richtcharakteristik) [6]

Die Strahllänge liefert zum einen Informationen über Laufzeit der ausgebreiteten Schallwelle und damit des Phasenversatzes, und zum anderen über die Dämpfung aufgrund des Abstandsgesetzes von in den Raum frei strahlenden Quellen.

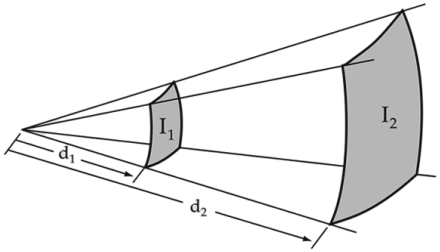


Bild 6: Schalldruckdämpfung aufgrund der Schallausbreitung [7]

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Der dritte zu bedenkende Punkt ist der Schnittpunkt des Strahls. Material und dessen Schallcharakteristik spielen hierbei eine entscheidende Rolle, wie die Schallwelle reflektiert wird. Ebenso kann die Oberflächenbeschaffenheit des Objektes für eine klare direkte Reflektion, aber genauso auch für eine diffuse Reflektion sorgen.

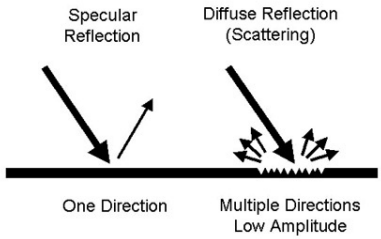


Bild 7: Ideale und diffuse Wellenreflektion [7]

Zusätzlich können noch weitere physikalische Effekte mit berücksichtigt werden, wie zum Beispiel der Einfluss der atmosphärischen Mediumsbedingungen wie Luftfeuchtigkeit und Temperatur, Nebel, Schnee etc...

7. Anbindung virtueller Signale an reale Hardware

Bei der Rückspeisung des simulierten Signales in die Fahrzeugumgebung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Sollen lediglich die Algorithmen zur Ultraschallauswertung getestet werden, kann das simulierte Signal direkt durch die Algorithmen verarbeitet werden und dann per CAN-Schnittstelle an den Fahrzeugbus übertragen werden. Befindet sich das reale Steuergerät im Testumfeld, kann das simulierte Signal aufgrund von Auswertkriterien der Sensoren über eine meist digitale Steuerleitung auch direkt an das Steuergerät angeschlossen werden. Hierbei ist zu beachten, dass dafür das Protokoll zwischen ECU und den Sensoren, genauso wie die Auswertkriterien der Sensoren bekannt sein muss. Den letzten Angriffspunkt, um das komplette System zu testen, sind die Steuerleitungen zum Piezoelement innerhalb der Sensoren. Wie weiter oben beschrieben, bilden diese die letzte Schnittstelle zwischen Sensorausgangssignal und der tatsächlichen Ausbreitung des Schalls. Mit Hilfe von passenden Analog/Digital-Wandlern lassen sich die Spannungsimpulse des Sensors einlesen und mittels geeignetem Sensormodell in ein digitales Schalldrucksignal wandeln. Dieses Schalldrucksignal wird über das Ausbreitungsmodell zu einem Antwortsignal verarbeitet, welches dann mit Digital/Analog-Wandlern als Spannungssignal an die Piezoelemente gegeben wird, um auf den Trigger zu reagieren. Um auf die nötige Samplerate der Wandler

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

zu kommen werden an den PC angeschlossene FPGA-Boards verwendet, die Wandlungen bis in den MHz-Bereich bewerkstelligen können.

8. Fazit

Dieser neue Ansatz der Sensorsimulation ermöglicht einen weitaus detaillierteren Blick auf die Umgebung, als nur auf die kürzeste Distanz zwischen Objekten zu schauen. Es zeigen sich allein auf Grund der geometrischen Eigenschaften verschiedenster Objekte Effekte, die die Detektion deutlich erschweren. So werden für Ultraschall-Sichtbarkeitstest oft Rundpfosten verwendet, weil diese aufgrund ihrer runden Geometrie aus allen Blickwinkeln gut sichtbar sind.

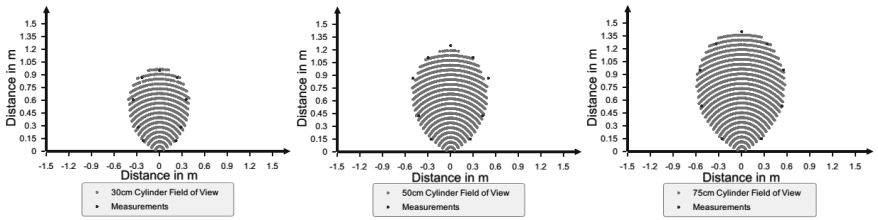


Bild 8: Sichtbarkeit Rundpfosten: 30cm (Links), 50cm (Mitte) und 75cm (Rechts) Durchmesser[8]

Versucht man jedoch Vierkantpfosten aus verschiedenen Blickwinkeln zu erkennen, zeigt sich, dass bei einer Ausrichtung direkt auf eine Kante, der Pfosten auf einmal verschwindet. Dieser oft auch als Tarnkappeneffekt bezeichnete Effekt, lässt sich auch bei der Simulation mit dem Raytracing beobachten.

[8] Nach eigener Darstellung. Sichtbarkeit für einen Sensor.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

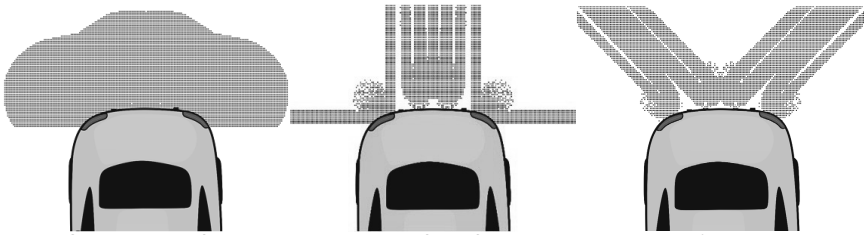


Bild 9: Sichtbarkeit: Pfosten (Links), Vierkantpfoste frontal (Mitte) und um 45° gedreht (Rechts)[9]

Des Weiteren bietet dieser Ansatz eine Vielzahl an Möglichkeiten physikalische Modelle mit zu integrieren. Detektionsentscheidungen müssen so nicht mehr auf der reinen Distanz getroffen werden, sondern können über einen Schalldruckpegel, welcher auch im realen Sensor ausschlaggebend ist, bestimmt werden. Zusätzlich lassen sich Modelle einbinden, welche den Unterschied zwischen dem Verhalten einer echten Welle und dessen Diskretisierung aus Strahlen noch geringer werden lassen. So zeigt sich, dass bei gewissen Materialeigenschaften nicht nur eine Reflektion nach dem Reflektionsgesetz entsteht, sondern es auch zum Scattering, einer diffusen Reflektion in allen Richtungen, kommen kann.

Zu bedenken jedoch ist, dass Raytracing ein Brute Force Verfahren ist und trotz hoher Parallelisierbarkeit rechenintensiv sein kann. Zudem erfordert die Berechnung der GPU einen Datenaustausch zur CPU, der durch die Bandbreite der Verbindung limitierend sein kann. Die Berechnung in Echtzeiten von unter 4ms pro Berechnungsschritt ist somit schwer erreichbar. Um den Overhead möglichst klein zu halten, empfiehlt es sich mehrere Sensoren zusammenzufassen und durch einen Raytracing Schritt zu berechnen. Da in jeden Raytracingschritt ganze Signalfenster, im Fall von Ultraschall meist 30ms, berechnet werden, ergibt sich hier meist nur ein kleiner vernachlässigbarer Ortsfehler, da sich das Fahrzeug in der Zwischenzeit weiterbewegt hat (Millimeterbereich).

Neben dem hier angesprochenen Anwendungsfall für die Simulation von Ultraschallsensoren, lässt sich das Verfahren auch universell für eine Vielzahl an verschiedenen anderen Sensortypen anwenden. Andere Wellenausbreitungsbasierende Sensorarten, wie zum Beispiel Radar, lassen sich analog zur Ultraschallsimulation aufbauen. Hierfür müssen lediglich die Modellparameter und andere physikalische Effekte mitberücksichtigt werden. Sensoren, die auf die Ausbreitung von Lichtstrahlen basieren, wie LiDAR Systeme, können sogar noch einfacher umgesetzt werde, da hier keine Welle mit einer Strahlenmenge genähert werden

[9] Nach eigener Darstellung. Sichtbarkeit für vier Heck-Sensoren.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

muss, sondern nur die tatsächlichen Lichtstrahlen berechnet werden müssen. Da die Engine eine Rendering Pipeline mitliefert, lassen sich die erstellten Szenerien ohne hohen Aufwand grafisch darstellen und können somit auch für visuelle Systeme wie Kamerasensoren verwendet werden. Damit lassen sich alle möglichen Sensorarten, die für verschiedenste Fahrerassistenzsysteme verwendet werden, in einer Umgebung simulieren. Diese Kombination ermöglicht auch die einfache Entwicklung von Sensorfusionsalgorithmen, da die Simulation der verschiedenen Sensortypen in ein und derselben Umgebung eingebunden werden können und zusammenhängende Sensordaten liefern.

Literatur:

[1] Mathematical Applications Group, Inc., „3-D Simulated Graphics Offered by Service Bureau," *Datamation 13,* p. 69, Feb 1968.

[2] Wikipedia, „Raytracing," [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Raytracing. [Zugriff am 09 Mai 2017].

[3] C.´. A. Navarro, Nancy Hitschfeld-Kahler und Luis Mateu, „A Survey on Parallel Computing and its Applications in Data-Parallel Problems Using GPU Architectures," in *Commun. Comput. Phys.*, 2014, pp. 285-329.

[4] Khronos Group, „OpenCL the open standard for parallel programming of heterogeneous systems," Khronos Group, [Online]. Available: https://www.khronos.org/opencl/. [Zugriff am 08 Mai 2017].

[5] NVIDIA Corporation, „PARALLELE BERECHNUNGEN MIT CUDA," [Online]. Available: http://www.nvidia.de/object/cuda-parallel-computing-de.html. [Zugriff am 5 Mai 2017].

[6] EKULIT, „Waterproof type ultrasonic sensor," [Online]. Available: http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/182244-da-01-en-ULTRASCHALL_SENSOR_A_14P20.pdf. [Zugriff am 09 Mai 2017].

[7] Wikipedia, „Abstandsgesetz," [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Abstandsgesetz. [Zugriff am 09 Mai 2017].

[8] Toronto Western Hospital, „Ultrasound for Regional Anesthesia," [Online]. Available: http://www.usra.ca/regional-anesthesia/introduction/basic.php#reflection. [Zugriff am 09 Mai 2017].

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

FMI in der Simulation von Fahrdynamikregelsystemen

FMI for Simulation of Vehicle Dynamics Control Systems

M. Sc. **Dirk Frerichs**, Dr.- Ing. **Matthias Borsdorf**,
Dipl.- Ing. **Karl Michael Hahn** (FH),
Adam Opel GmbH, Rüsselsheim am Main

Kurzfassung

Der verstärkte Einsatz der Simulationsmethoden in frühen Phasen der Entwicklung in der Automobilindustrie führt zu einer starken Nachfrage an Modellen mit hoher Qualität und Modularität. Um den Modellaustausch zwischen Automobilhersteller und Zulieferer zu vereinfachen, existiert der Tool-unabhängige Standard „Functional Mock-up Interface“ (FMI). In diesem Beitrag wird verdeutlicht, wie sich ein solcher Standard in gegenwärtigen Entwicklungsprozessen einsetzen lässt. Ein Beispielmodell wird in ein bestehendes Framework integriert und anschließend eine Untersuchung für verschiedene Simulationsanwendungen durchgeführt und die Effekte von Modellen mit FMI Standard auf die Simulationszeit dargestellt. Daraus abgeleitet lässt sich das Einsatzpotential im gegenwärtigen Simulationsprozess bei Opel bewerten.

Abstract

The increasing use of simulation methods in early development phases in the automobile industry lead to a high demand of simulation models with a high quality and modularity. To improve the model exchange between automobile manufacturer and supplier a tool independent standard named “Functional Mock-up Interface” (FMI) was defined. The aim of this paper is to have a closer look how this standard can be integrated in to present development processes. For this purpose an example is integrated in an existing simulation framework and investigated for different simulation use cases and the effects of models with FMI standard for the simulation performance are showed. The potential of the use of FMI is finally assessed for the present simulation process at Opel.

1. Einleitung

Durch die gestiegenen Anforderungen an die Automobilentwicklung aufgrund von immer mehr Fahrzeugvarianten und immer kürzeren Entwicklungszeiten wird der frühzeitige Einsatz der Simulation zunehmend wichtiger [1]. Die Simulationsmodelle sind dabei essentieller Be-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

standteil für eine entwicklungsbegleitende Systemanalyse [2]. Insgesamt wird versucht in einer frühen Entwicklungsphase bereits Architekturen mit Hilfe der Simulation zu bewerten. Die nachgefragten Streckenmodelle und virtuellen Steuergeräte müssen den Anforderungen verschiedener Kunden gerecht werden. Des Weiteren wollen Zulieferer und Automobilhersteller (OEM), ihr Know-how über systemspezifische Eigenschafften nicht offenlegen. Insbesondere haben sich je nach Aufgabenstellung verschiedene Entwicklungsprozesse mit verschiedenen Werkzeugen, den sogenannten „Best of Class"- Tools, etabliert. Wollen nun Supplier und OEM ihre Modelle austauschen, kann es an den Schnittstellen beider Entwicklungsprozesse zu Konflikten kommen.

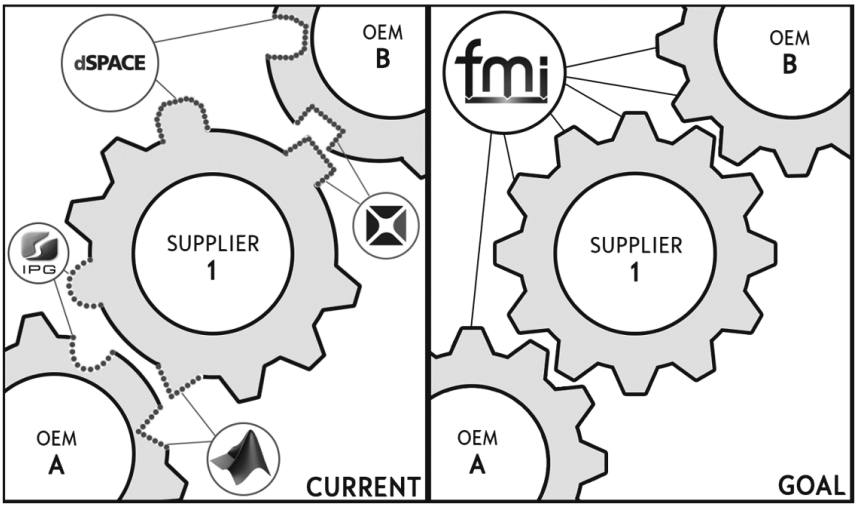


Bild 1: Heutiger exemplarischer Modellaustausch zwischen OEM und Supplier (links)
Standardisierter Austausch von Modellen mit FMI (rechts)

In Bild 1 ist eine solche Interaktion verschiedener Entwicklungsprozesse symbolisch dargestellt. Um dieses Konfliktpotential zu reduzieren und die Synergien der Prozesse zu nutzen, wurde der standardisierte Tool-unabhängige Modellaustausch Functional Mock-up Interface (FMI) entwickelt [3]. Damit wird ermöglicht, Modelle für verschiedene Simulationsplattformen zur Verfügung zu stellen, sowie auch das geistige Eigentum (intellectual property ‚IP) zu schützen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Einsatzmöglichkeiten des FMI Standards in einer bestehenden Simulations-Werkzeugkette in der Automobilindustrie zu bewerten. Dabei liegt der Schwer-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

punkt im Bereich der X-in-the-Loop (XIL) Anwendungen. Grundlage muss sein, dass ein Modell zu jedem Zeitpunkt in der Entwicklung genutzt werden kann. Sowohl die Anwendbarkeit in einem bestehenden Systemintergrations Framework, als auch die Echtzeitfähigkeit, werden an Hand eines Beispiels untersucht.

Im Folgenden wird das Konzept des Functional Mock-up Interface vorgestellt. Im Anschluss wird gezeigt, wie sich solch ein Standard in den Entwicklungsprozess integrieren lässt, und anhand von diversen Simulationen das Einsatzpotential dargestellt.

2. Konzept des Functional Mock-up Interface

Der Ausgangspunkt, ein Modell für verschiedene Plattformen zur Verfügung zu stellen und dabei das geistige Eigentum nicht offenzulegen, beschreibt eines der gegenwärtigen Probleme in der Automobilindustrie. Ziel muss es sein, einen Standard zu etablieren, welcher es ermöglicht, verschiedene Entwicklungsprozesse miteinander zu koppeln und Probleme an den Schnittstellen zu eliminieren.

Eine Möglichkeit besteht darin, eine standardisierte objektorientierte Modellierungssprache zu etablieren, wie Modelica [4]. Ein anderer Ansatz ist, ein standardisiertes Interface für den Modellaustausch zwischen Tools, wie das Functional Mock-up Interface (FMI), zu definieren.

Die erste Version des FMI Standards wurde im Jahr 2010 publiziert [5]. Seit dem Jahr 2014 existiert der Nachfolger FMI 2.0 [6]. Über die Zeit ist die Anzahl der Tools, die den FMI Standard unterstützen, gestiegen. Der FMI Standard beschreibt, welche Funktionsköpfe und Parameter benötigt werden, jedoch nicht wie die Funktionsrümpfe implementiert sein müssen. Diese werden durch das jeweilige Modellierungstool definiert. Das Interface ermöglicht es, dass die verschiedenen Modelle über die definierten Funktionen kommunizieren. Die Definition des Interfaces liegt als Header-Datei in C vor.

Im Folgenden wird ein Modell mit FMI Standard als Functional Mock-up Unit (FMU) bezeichnet. Ein Modell in Form einer FMU besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen:

1. Die C- Funktionen, welche für die Kommunikation mit der Umgebung gebraucht werden, sowie die eigentliche mathematische Beschreibung des Modells. Diese C Funktionen können als Kompilat und/oder Quellcode vorliegen. Liegt die FMU als Kompilat vor, dient dies gleichzeitig zum Schutz des geistigen Eigentums.
2. Eine XML (Extensible Markup Language) Datei enthält die essentiellen Definitionen der FMU. Diese XML Struktur ist in Bild 2 dargestellt. So werden neben der nach außen sichtbaren Modellstruktur (Ein- und Ausgänge) auch die Modellparameter definiert. Diese definierten Größen werden als Modellvariablen bezeichnet.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Modellvariablen sind wesentlicher Bestandteil der XML Datei, wobei eine exemplarische Beschreibung einer Modellvariablen in Bild 3 abgebildet ist. Diese Modellvariablen besitzen die Eigenschaft, dass sie ausschließlich eine skalare Größe beschreiben. Jede Variable besitzt dabei verschiedene Attribute wie z.B. „Name“, „Variability“ oder „Causality“. Mit der letzteren Eigenschaft kann definiert werden, ob es sich um eine Eingangs-, Ausgangsvariable oder einen Parameter handelt. Insbesondere mit Blick auf die Parametrierung kann unterschieden werden zwischen fixierten oder veränderbaren Parametern. Fixierte Parameter sind die Parameter, die nach der Modellinitialisierungsphase nicht mehr verändert werden können. Dabei wird zum Beginn der Simulation t_0 die Anfangswerte $\mathbf{x_c(t_0)}$ bestimmt bzw. diese über die hinterlegten skalaren Variablen, im XML File initialisiert.

Hingegen können veränderbare Parameter während der Simulation online verändert werden. Dazu wird die Simulation angehalten, der Parameter verändert und alle parameterabhängigen Größen neu berechnet. Mit diesem Ansatz soll verhindert werden, dass es durch eine Parameteränderung zu Einschwingvorgänge im System kommt [6].

Damit die FMU mit ihrer Umgebung kommunizieren kann, sind in der jeweiligen XML Datei sogenannte *ValueReference* definiert, welche die Verknüpfung von Variablennamen auf interne Variablen der FMU zuordnet. In der FMU selbst sind ebenfalls die C- Funktionen hinterlegt, mit welcher man die Werte schreiben *fmiSet<Datentyp>(….)* bzw. lesen *fmiGet<Datentyp>(….)* kann. Dabei steht *<Datentyp>* für einen der verwendeten Datentypen *Real*, *Integer*, *Boolean* oder *String*.

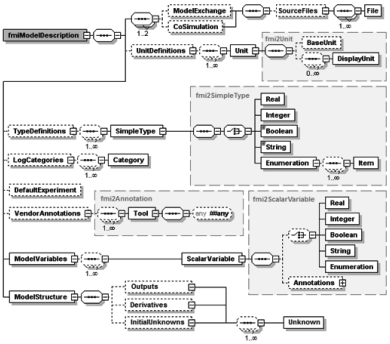


Bild 2: XML Struktur einer FMU [7]

```
<ScalarVariable name        = "Kp"
    valueReference          = "2"
    description             = ""
    variability             = "tunable"
    initial                 = "exact"
    causality               = "parameter">
    <Real  start = "1.5"
       min    = "-3.402823466E+38"
       max    = "3.402823466E+38" />
</ScalarVariable>
```

Bild 3: Exemplarischer Inhalt einer skalaren Variablen

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Ein weiterer Aspekt von FMI ist neben dem gemeinsamen Austausch von Modellen über einheitliche C-Funktionen, dass die Modelle durch verschiedene Simulationsvarianten kombiniert werden können. Die zwei grundsätzlichen Simulationsvarianten sind in Bild 4 für eine FMU mit ihrem jeweiligen Datenfluss dargestellt.

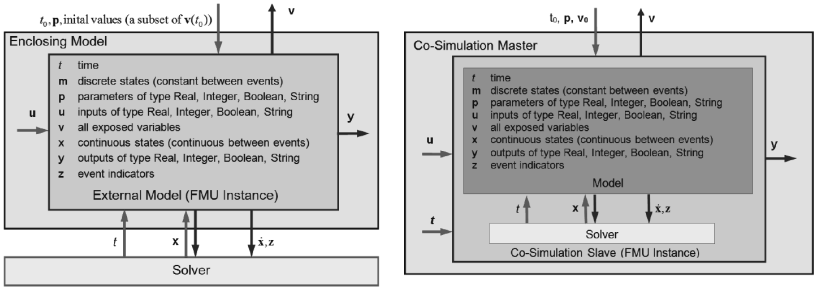


Bild 4: Datenfluss einer FMU für Model Exchange (links) und Co-Simulation [7] (rechts)

1. FMI für Model Exchange

In der Variante *Model Exchange* (ME) wird das Modell mit vordefinierten Ein- / Ausgängen und Parametern geliefert. Dabei können die Zustandsgrößen $\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{t})$ und die Ausgangsgrößen $\mathbf{y}(\mathbf{t})$ diskret und/oder zeitkontinuierlich in Abhängigkeit der Eingangsgröße $\mathbf{u}(\mathbf{t})$ bestimmt werden. Das dynamische Modell wird in dieser Variante mit dem Solver der Integrationsumgebung berechnet.

2. FMI für Co-Simulation

Des Weiteren gibt es die Möglichkeit FMI für *Co-Simulation* (CS) einzusetzen. Diese Möglichkeit ist dadurch charakterisiert, dass die verschiedenen Simulationsumgebungen (Slaves) miteinander gekoppelt werden und über den sogenannten Master kommunizieren. Diese Technik ermöglicht es, dass die Modelle mit den Solvern der jeweiligen Modellierungsumgebung simuliert werden können. Zu diskreten Zeitpunkten $t_{ci,Master}$ übergeben die Slaves ihre Ausgangsgrößen $\mathbf{y}(\mathbf{t})$ und übernehmen die Eingangsgrößen $\mathbf{u}(\mathbf{t})$ von dem Master. Es kann zwischen zwei Typen einer FMU für Co-Simulation unterschieden werden:
Zum einen kann der Solver in der FMU eingebettet sein (standalone), zum anderen kann es notwendig sein, dass die Modellierungsumgebung der FMU geöffnet ist und deren Solver genutzt wird. Jedoch ist bei beiden Typen gleich, dass die Zustandsgrößen $\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{t})$ der FMU unabhängig vom Masteralgorithmus bestimmt werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3. FMI als Bestandteil einer Integrationsplattform

In diesem Abschnitt soll zum einen das bei der Adam Opel GmbH eingesetzte Simulationsframework (Master-Model) vorgestellt werden, zum anderen wird erklärt wie sich eine FMU in den bestehenden Entwicklungsprozess einbinden lässt.

3.1. Master-Model Framework

Um den gegenwärtigen Herausforderungen der Entwicklung von Fahrzeugen gerecht zu werden, wird bei der Adam Opel GmbH der Master-Model Ansatz verfolgt [8]. Grundlage bildet das zentrale Framework für Hardware-in-the-Loop (HIL)- und Offline-Simulation. Als HiL Plattform wird das *dSpace ds1006* System verwendet. Das Master-Model Framework kann der Nutzer für den entsprechenden Einsatz selbstständig konfigurieren. Dabei wird als Basis die offene Integrations- und Testplattform *CarMaker* für *Simulink* von *IPG Automotive* verwendet, die in vielen Komponenten mit eigenen Modellen erweitert wurde. Diese Komponenten sind in speziellen Modellbibliotheken organisiert und liegen in unterschiedlicher Komplexität vor. Die Parameter werden unabhängig von Modellen gepflegt. Die ausgewählten Modellkonfigurationen können dabei in Form von XML-Files abgespeichert und später wiederverwendet werden. Damit die zahlreichen Nutzer aus den unterschiedlichen Entwicklungsbereichen auf den gleichen Stand validierter Modelle, Parameterfiles, Testszenarien, Dokumentationen, etc. zu greifen können, wurde hierfür eine globale Datenbanklösung realisiert (*IBM Rational Synergy*), die das Konfigurationsmanagement und die Versionskontrolle beinhaltet. Im Folgenden soll gezeigt werden, wie sich eine FMU in die bestehende Simulationsumgebung integrieren lässt.

3.2. Integration der FMU in das Master-Model

Als erstes Beispiel einer FMU dient ein Torque Response Model (TRM), welches in Abhängigkeit der Gaspedalstellung α_{Ped} und Motordrehzahl ω_{Motor} ein Drehmoment

$$M_{Motor} = f(\alpha_{Ped}, \omega_{Motor}) \tag{1}$$

berechnet. Das Drehmoment M_{Motor} wird dabei über ein hinterlegtes Motorkennfeld bestimmt. Bei diesem Modell handelt es sich um ein echtzeitfähiges Modell, welches die für die Anwendungen relevanten physikalischen Eigenschaften des Motors berücksichtigt. Das Modell wurde in *Matlab/Simulink* realisiert und mit Hilfe der FMI Toolbox 2.3.1. von *Modelon* in eine FMU für Model Exchange (ME) und Co-Simulation (CS) in der Version 1.0 überführt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Dabei wird das *Simulink* Modell in einem geeigneten Kompilat für die Windowsplattform 64-Bit erzeugt.

Ähnlich wie beim Master-Model Ansatz, werden bei der FMU Parameter und Modellstruktur voneinander getrennt betrachtet. Neben der Beschreibung der Schnittstellen zur Umgebung werden ebenfalls Kennfelder abgelegt. Jedoch wird jeder Datenpunkt in den Kennfeldern über eine skalare Variable beschrieben, wodurch die Parametrierbarkeit erschwert wird, weil sehr viele skalare Variablen entstehen. Die erzeugte FMU lässt sich unkompliziert mit Hilfe der vorgestellten *Modelon* Toolbox in das *Simulink* Framework, sowohl für ME als auch für CS, integrieren. Des Weiteren lässt sich die FMU für CS in *IPG CarMaker* direkt integrieren, ohne dass sie in *Simulink* eingebunden werden muss. In diesem Fall wird *IPG CarMaker* als Masteralgorithmus, und nicht *Matlab/Simulink*, verwendet.

Für die gegenwärtige HiL Generation ist der zuvor erwähnte FMU Erzeugungsprozess mit der *Modelon* FMI Toolbox jedoch nicht zu verwenden. Das liegt vor allem daran, dass sich die eingesetzten Hardwareplattformen voneinander unterscheiden. Damit eine FMU für die *dSpace* Plattform erzeugt werden kann, muss jedoch der C-Quellcode offen zur Verfügung stehen, woraus dann ein passendes statisches Kompilat für die Plattform erzeugt werden kann.

Dies wird von *dSpace ds1006* Systemen nicht unterstützt. Für die neue Generation der *dSpace* Plattform *Scalexio* besteht die Möglichkeit eine FMU für CS 2.0 über ein Zusatztool direkt zu integrieren. Liegt eine statische Bibliothek für ein *Scalexio* System und eines für Win64- Bit vor, werden beide Modellkompilate in einer FMU verwaltet. Die Zielhardware wählt selbstständig das richtige Kompilat aus.

4. Einsatz von FMI in der Simulation

In Bild 5 ist der zeitliche Verlauf für einen Beschleunigungsvorgang für das Modell aus (1) dargestellt. Dabei steht das Modell für die Simulationsvariante ME und CS zur Verfügung. Es besteht die Möglichkeit in der CS die Abtastzeiten des Masters $t_{ci,Master}$ und des Slaves $t_{ci,Slave}$ frei vorzugeben, solange die Bedingung

$$t_{ci,Master} \leq n \cdot t_{ci,Slave} \tag{2}$$

erfüllt ist, wobei die $n \in \mathbb{N}$ gelten muss. Dies ermöglicht die Modelle mit der notwendigen Abtastzeit zu simulieren, welche durch das Modellierungstool ggf. vorgegeben wird. Es ist zu sehen, dass bei gleicher Abtastzeit $t_{ci,Master} = t_{ci,Slave} = 0.001s$ keine wesentlichen Abweichungen zwischen ME und CS zu beobachten sind. Wird die Abtastzeit zu $t_{ci,Slave} = 0.1s$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

gewählt, ist deutlich zu erkennen, dass die Kommunikation mit dem Master diskret ist. Zum anderen ist ersichtlich, dass die Kommunikationsschritte nicht zu groß gewählt werden dürfen, da sonst die Gesamtmodellgüte, aufgrund des Signalversatzes, nicht mehr gewährleistet werden kann.

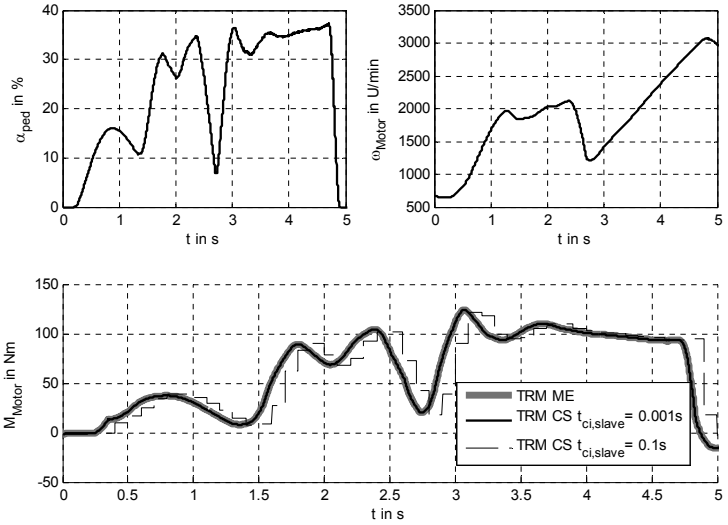


Bild 5: Modellverhalten für verschiedene Simulationsvarianten mit Variation der Abtastzeit

Bild 6 zeigt den Einfluss auf die Simulationsperformance für verschiedene Simulationskonfigurationen. Die Simulationsperformance

$$\eta = \frac{T_0}{T_L} \tag{3}$$

beschreibt dabei das Verhältnis zwischen minimaler Simulationslaufzeit T_0 und tatsächlicher Simulationslaufzeit T_L. Die minimale Simulationslaufzeit T_0 ist dabei die Simulationszeit des Basismodells ohne jegliche Integration von weiteren Modellen. Es werden drei Konfigurationsmöglichkeiten miteinander verglichen. Im ersten Fall wird das TRM für ein beliebiges Manöver verglichen. Es ist zu sehen, dass die Konfiguration mit einem herkömmlichen *Simulink* Modell die schlechteste Simulationsperformance η liefert. Das liegt darin begründet, dass

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

das Modell, welches als Blockdiagramm vorliegt, zu jedem Simulationsschritt interpretiert werden muss. Steht das Modell zum ME zur Verfügung lässt sich die Simulationszeit T_L verkürzen, da es sich um einen von *Simulink* unabhängig ausführbaren Code handelt. Jedoch ist es langsamer, als die Einbindung per CS, da die Kommunikation zeitkontinuierlich und nicht zeitdiskret stattfindet. Um diese Beobachtung zu bestätigen, ist mit Hilfe der zuvor vorgestellten Toolbox ein Lenkungsmodell nach [9] in eine FMU überführt worden. Die zuvor beobachten Ergebnisse lassen sich für dieses Modell bestätigen.

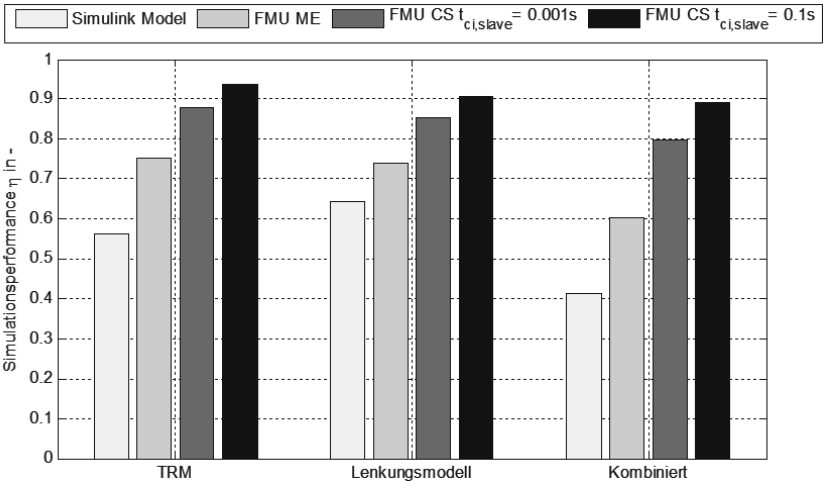


Bild 6: Echtzeitfaktor für verschiedene Simulationsvarianten mit verschiedenen Modellen mit unterschiedlichen Abtastzeiten.

Wird eine Simulation mit beiden Modellen kombiniert durchgeführt, lässt sich beobachten, dass die Simulationszeit T_L zwar insgesamt zunimmt, jedoch diese sich nicht wesentlich für die CS niederschlägt. Mit Hilfe der FMUs kann die Simulationsperformance η für die Offlinesimulation gesteigert werden, ohne dabei an Modellqualität zu verlieren.

5. Fazit und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, wie sich der Tool-unabhängige Standard FMI in gegenwärtigen Simulationsprozessen bereits in Teilen effektiv einsetzen lässt. Dabei wurde das Konzept des Tool-unabhängigen FMI nochmal mit seinen Konfigurationsmöglichkeiten, dem Model Exchange und der Co-Simulation, vorgestellt. Im Anschluss wurde eine FMU eines echtzeit-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

fähigen Motormodels erstellt und in das bestehende Simulationsframework integriert. Während eine Simulation mit dem *dSpace ds1006* System nicht möglich war, konnte im Bereich der Offline Simulation das Potential des FMI Standards untersucht werden. Neben weiteren Möglichkeiten ein Modell zu parametrieren, um damit FMUs wiederzuverwenden, konnte zusätzlich herausgearbeitet werden, wie eine Co-Simulation eingesetzt werden kann, um das Framework recheneffektiver zu gestalten ohne die Modellqualität zu reduzieren. Auf diesen Ergebnissen aufbauend muss geprüft werden, inwiefern FMI als fester Bestandteil in den Simulationsprozess verankert werden kann, da Modelle nicht durchgängig für alle Simulationsanwendungen ohne weiteres genutzt werden können. Außerdem bleibt die Frage offen, inwiefern sich Simulinkmodelle für *dSpace* kompilieren lassen, in denen FMUs integriert sind.

Literaturangaben

[1] Kochem, M. u. Holzmann, H.: Einsatz der Road-Lab-Math Strategie bei der simulationsbasierten Entwicklung von Fahrdynamikregelsystemen (Application of the Road-Lab-Math Strategy in Simulation-based Development of Chassis Control Systems). at – Automatisierungstechnik 55 (2007) 7

[2] Hahn, K. M., Holzmann, H., Weyer, F., Roemer, M., Webb, J. u. Boltshauser, S.: Simulation-based Certification of ESC Systems for Passenger Vehicles in Europe (2012)

[3] Blockwitz, T., Otter, M., Arnold, M., Bausch, C., Clauß, C., Elmqvist, H., Junghanns, A., Mauss, J., Monteiro, M., Neidhold, T., Neumerkel, D., Olsson, H., Peetz, J.- V. u. Wolf, S.: The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models. Modelica Konferenz 2011

[4] Otte, M. u. Elmqvist H.: Modelica. Language, Libraries, Tools, Workshop and EU-Project RealSim (2011)

[5] MODELISAR: Functional Mock-up Interface for Co-Simulation (2010)

[6] Modelica Association Project “FMI”: Functional Mock-up Interface 2.0 (2014)

[7] Blockwitz, T., Otter, M., Akesson, J., Arnold, M., Clauß, C., Elmqvist, H., Friedrich, M., Junghanns, A., Mauss, J., Neumerkel, D., Olsson, H. u. Viel, A.: Functional Mockup Interface 2.0: The Standard for Tool independent Exchange of Simulation Models. 9. Modelica Konferenz 2012, S. 173–184

[8] Schaffnit, J., Holzmann, H., Lauer, J. u. Klemmer J: Fahrzeugmodelle effizient und nachhaltig managen. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 119 (April) 2017, S. 42–46

[9] Pfeffer, P. E.: Interaction of vehicle and steering system regarding on-centre handling. University of Bath 2006

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Einfluss automatisierter Fahrfunktionen auf Auslegung und System Design von Bremssystemen

Influence of automated driving functions on system design of brake systems

Dr.-Ing. **Thorsten Ullrich**, **Martin Baechle**,
Continental, Chassis & Safety Division, Frankfurt am Main

Kurzfassung

1: Zuweisung der Aufgaben aus der SAE J3016

In dem o.a. SAE Dokument werden die unterschiedlichen Stufen automatiserten Fahrens definiert, von Stufe 0 (keine Automation) bis Stufe 5 (fahrerloses Fahrzeug). Beginnend mit Stufe 3 müssen die Systeme, welche die Fahraufgabe planen und ausführen, redundant ausgeführt sein, weil die Übergabe der Ausführung der Fahraufgabe vom System an den Fahrer Zeit benötigt (Stufe 3) oder gar nicht zur Verfügung steht (Stufe 5). Die SAE Stufe 3 verlangt, dass der Fahrer jederzeit in der Lage ist, die Kontrolle über das Fahrzeug wieder zu übernehmen. Bei SAE Stufen 4 und 5 dagegen kann nicht mehr mit einer Übernahme durch den Fahrer gerechnet werden, also muss das System in der Lage sein, die Fahrt mit einem sicheren Zustand zu beenden, wie z.B. Parken des Fahrzeugs in dafür vorgesehener sicherer Umgebung.

2: Gesetzlich geforderte Redundanz für Bremssysteme bis einschliesslich SAE Stufe 2

Die ECE und FMVSS Regularien beschreiben die vorgeschriebenen Eigenschaften von Bremssystemen in verschiedenen Zuständen und ebenso die Tests, welche zur Homologation ausgeführt und bestanden werden müssen. Die verlangte Leistungsfähigkeit nach beliebigem Erstfehler ist dabei eingeschlossen. Der Gesetzgeber geht davon aus, dass Mehrfachfehler unwahrscheinlich sind und daher nicht berücksichtigt werden müssen. Aber die Erstfehler müssen vom Bremssystem durch eine kontrolliert ablaufende Fehlerreaktion sowie entsprechende Fahrer Information über diesen Zustand abgedeckt werden. Falls eine bestimmte Reduzierung der Leistungsfähigkeit des Bremssystems eintritt, soll der Fahrer nach entsprechender Warnung die Fahrt sofort beenden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3: Erstfehler und System Degradierung heutiger Bremssysteme

Die heute üblichen Bremssysteme können Fehler aufweisen, bei denen entweder elektrische Komponenten oder mechanische Komponenten betroffen sind, wie z.B. Leckage oder mechanische Beschädigung. Solche Erstfehler können zu einem Zustand führen, bei dem das Bremssystem nicht mehr den geforderten Mindestwert an möglicher Verzögerung aufweist, oder auch dem Fahrer zum Erreichen dieser mindestens geforderten Verzögerung eine höhere Pedalkraft abverlangt. Ebenso kann die Fahrzeugstabilität beim Bremsen reduziert sein, z.B. durch Ausfall der ESP Funktion. In praktisch allen diesen Fällen soll der Fahrer auf die reduzierte Leistungsfähigkeit des Systems mit vorsichtiger und angepasster Fahrweise reagieren, wie z.B. reduzierte Geschwindigkeit, keine Überholmanöver usw.

4: Ableitung der Anforderungen von heutigen auf künftige Bremssysteme

Die SAE Stufe 3 mit der geforderten Übernahme durch den Fahrer begrenzt den Zeitanteil, in dem das Bremssystem trotz Erstfehler selbständig das Fahrzeug verzögern kann, auf die Zeit, die der Fahrer zur Übernahme benötigt. Trotzdem muss in diesem Zeitraum die vom Gesetzgeber geforderte Mindestverzögerung auch nach Erstfehler abrufbar sein. Der reduzierte Zustand ist dem verantwortlichen Fahrer anzuzeigen, das kann entweder der menschliche Fahrer sein oder aber der Auto-Pilot. Je nach Schwere des Erstfehlers bzw je nach Reduzierungsgrad der Eigenschaften des Bremssystems, muss die Fahrt sofort beendet werden. Das ab Stufe 3 notwendige Bremssystem, welches näher erklärt wird, besteht aus zwei unabhängigen Bremsdruckerzeugern, welche nicht gleichzeitig ausfallen können.

Abstract

1: Distribution of tasks defined by SAE J3016

In before mentioned SAE paper the different levels of driving are defined, covering from Level0 (no automation) up to Level5 (full automation).

Starting with level3 as defined in SAE paper related to driving automation systems for on-road motor vehicles the systems that plan and execute dynamic driving tasks need to provide redundancy on its own. This because transition of system control (Auto-Pilot active) to human driver control takes certain time (Level3) or is not planned at all (Level5). The SAE Level3 requests the driver to be able to return to “driver controlled mode” at any time. For SAE Level4 and 5 the driver is not even requested to take over during the use case, so the system responsibility can only end with a safe vehicle state, such as secured parking in safe area.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2: Legally required redundancy for brake system functionality of SAE Level 0-2

The ECE and FMVSS regulation describe the required performance of braking systems in different use cases and describe the testing procedures that are obligated to fulfill during homologation procedure. The requested system performance after any 1st failure mode is included, and the regulations suggest that dual failure modes are unlikely to happen and are not necessarily to be considered. But the 1st failure needs to be covered by a controlled system degradation including information strategy so that the driver gets aware of the degraded performance and, in case of severe malfunction, is supposed to end the driving session immediately.

3: Failure modes and system degradation of todays in production brake system architecture

The today common service brake system architecture can have failure modes caused by E/E components or mechanical components, such as leakage or mech. damage. All 1st failure modes lead to system degradation which can lower the maximum possible vehicle deceleration capability or at least demand higher driver brake pedal force in order to reach the desired vehicle deceleration. As well vehicle stability may be reduced during braking. In nearly all such failure modes the driver needs to react with changing to more conservative driving strategy, i.e. lower speed, keep longer distance to traffic ahead, or take over wheel slip control by reducing brake torque via brake pedal release in case of wheel lock.

4: Deriving the requirements from existing to future brake system architecture

The SAE Level3 with the desired take over by the human driver in case of reduced system capabilities narrows the autonomous fail operational or fail degraded performance of the brake system to a very limited time span. Nevertheless, the secondary brake system performance as defined in the regulations, need to be performed after any 1st failure mode. The degradation status need to be signaled to the device that has the responsibility to plan and execute the driving task, this would be either the human driver or the auto pilot. Based on severity of degradation, the responsible may need to end the driving session immediately. The brake system, in more detail to be explained, consists of two independent brake pressure provider, that do not undergo common cause failure modes at the same time.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

0: Anforderungen an Bremssysteme allgemein



Bild 1: Anforderungen an Bremssysteme allgemein

Bremssysteme von Continental müssen vielfältige Anforderungen erfüllen, ganz zuvorderst natürlich die Sicherheitsanforderungen zum Bremsweg und der Einhaltung der Fahrstabilität. Ebenso müssen die Systeme eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen und viele Jahre fehlerfrei funktionieren. Sollte es dennoch einmal zu einem Fehlerfall im elektronischen oder mechanischen Teil des Bremssystems kommen, muss eine geordnete Degradation des Systems stattfinden, welche den Fahrer – oder künftig den Autopilot – immer noch beherrschbaren Fahrzuständen aussetzt.

Umwelt Anforderungen sowie der wirtschaftlichen Betrachtung kommt ebenso sehr hohe Bedeutung zu, elektronische Bremssystem von Continental sind seit über 32 Jahren im Markt und erfüllen höchste technische Standards.

In den letzten Jahren fand eine Zunahme der den Fahrer bei seiner Fahraufgabe unterstützenden Funktionen statt, wie z.B. Abstandsregelung oder Notbremsassistent. Nun steht die Entwicklung an der Schwelle zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe durch das Fahrzeug und seine Systeme, dies erhöht die Anforderungen auch an das Bremssystem.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1. Zuweisung der Anforderungen definiert in der SAE J3016

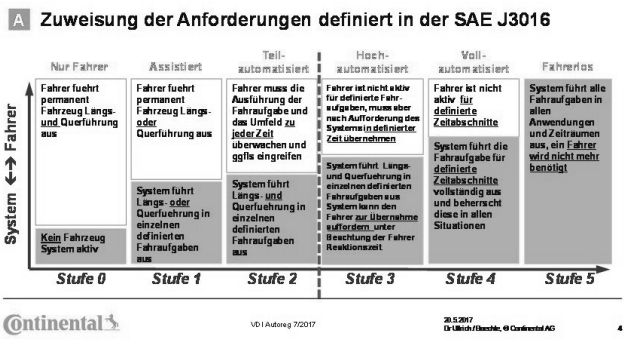


Bild 2: Zuweisung der Anforderungen definiert in der SAE J3016

In diesem SAE Papier werden die verschiedenen Stufen automatisierter Fahrfunktionen definiert, von bei Stufe 0 (nur Fahrer) bis Stufe 5 (nur Fahrzeug).

Beginnend mit Stufe 3 übernimmt das Fahrzeugsystem vollständig die Fahraufgabe, d.h. ab hier müssen alle Systeme auch bei auftretenden Systemfehlern die Fahraufgabe sicher beherrschen, zumindest für den Zeitraum, bis zu dem der Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug wieder übernommen hat.

Für das Bremssystem bedeutet das, dass ab der Stufe 3 eine vollständige Redundanz mit ggfls. reduzierten Eigenschaften vorhanden sein muss, da der Systemfehler in einen Zeitraum einer aktiven Bremsung fallen kann und der Fahrer nicht schnell genug übernehmen kann – er ist ja zu diesem Zeitpunkt nicht aktiv mit der Fahraufgabe beschäftigt.

Im Lastkollektiv zum Nachweis der Dauerhaltbarkeit heutiger PKW Bremssysteme finden sich nach VDA Standard 1,6 Millionen Bremsungen, einzelne Hersteller erhöhen dieses noch auf 2,6 Millionen. Der Nutzungszeitraum ist dabei auf 8000 Stunden Betriebszeit spezifiziert, das bedeutet überlagert dass durchschnittlich alle 11 Sekunden eine Bremsung stattfindet! Dies wiederum bedeutet, dass bei einem auftretenden Fehler im Bremssystem davon ausgegangen werden muss, dass dieser innerhalb oder unmittelbar vor einer Bremsung auftritt.

Obwohl also die Stufe 3 den Fahrer zu einer geordneten Übernahme der Fahrzeugkontrolle auffordern kann, und man geht hier von etwa 10-30 Sekunden Reaktionszeit aus, muss das Bremssystem auch bei Fehlerfällen ohne den Fahrer das Fahrzeug verzögern können.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2: wichtige Standards fuer Bremssysteme nach SAE Stufe 0-2



Bild 3: Wichtige Standards fuer Bremssysteme nach SAE Stufe 0-2 Teil 1

Die Anforderungen an die Verzögerungsleistung von heutigen Bremssystemen finden sich in den geltenden Gesetzen zur Fahrzeug Homologation (ECE R13H, FMVSS126 u.a.) Hierbei ist zu beachten, dass es sich zum einen um die minimalen Anforderungen handelt, d.h. dass der Stand der Technik deutlich höhere Verzögerungsleistung auch im Fehlerfall bietet. Zum anderen definiert der Stand der Technik die zulässige Auftretenshäufigkeit dieser Fehler: würden z.B. Fehler, die das Bremssystem bis zur gesetzlichen Mindestverzögerung von 2,44m/s² bei 500N Pedalkraft reduzieren, häufig vorkommen, würde die Unfallstatistik ansteigen und die Fehlerschwellen müssten angehoben werden.



Bild 4: Standards fuer Bremssysteme nach SAE Stufe 0-2 Teil 2

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Auch für die Funktionen der elektronischen Bremssysteme gibt es Regelungen: So wird dem Fahrer durchaus zugemutet, im Falle einer Stilllegung von ABS oder ESP entsprechend vorsichtiger zu fahren, d.h. ein Ausfall infolge Fehler ist zulässig, muss aber dem Fahrer angezeigt werden. Schließlich sind ja auch noch viele Fahrzeuge ohne ein solches System unterwegs.
Anders bei der sogenannten Blockier-Reihenfolge der Räder: diese ist gesetzlich vorgeschrieben, bei entsprechend hoher Verzögerung, welche den zur Verfügung stehenden Kraftschluss zwischen Reifen und Strasse überfordert, müssen die Vorderräder vor den Hinterrädern blockieren. Da diese Aufgabe heute in der Regel durch die EBV Funktion des elektronischen Bremssystems erfüllt wird, ist der entsprechende Ausfall dieser Funktion mit roter Warnlampe zu versehen. (EBV = elektronische Bremskraft Verteilung)

Zu beachten ist dabei die Verpflichtung des Fahrers infolge der Bewarnung: bei gelber Warnlampe kann der Fahrer die Fahrt fortsetzen, soll aber mit entsprechend vorsichtiger Fahrweise reagieren. Bei roter Warnlampe ist der Fahrer verpflichtet, die Fahrt umgehend zu beenden bzw. zu unterbrechen. Bei Weiterfahrt übernimmt der Fahrer die alleinige Haftung und wird bei daraus resultierenden Unfällen entsprechend zur Verantwortung gezogen.

3: Fehlerfälle und Systemreaktion am Beispiel Bremssystem MK C1

Mit der MK C1 hat Continental 2016 ein Brake-by-wire System auf den Markt gebracht, welches die Betätigung und die Bremsdruck Modulation in einem one-box Gerät zusammenfasst.

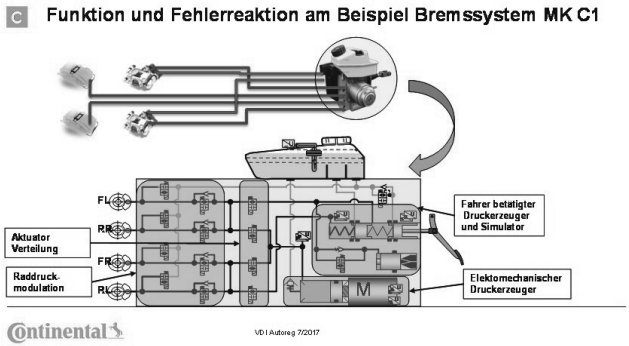


Bild 5: Funktion und Fehlerreaktion am Beispiel Bremssystem MK C1 Teil 1

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Durch die By-wire Funktion auch für Fahrerbremsungen sowie die hohe Dynamik des Druckerzeugers ist das Gerät bestens geeignet für den Einsatz in Fahrzeugen mit AD Funktionalität. Im Folgenden wird die Fahrerbremsfunktion sowie die Systemreaktion bei Ausfall des Systems durch elektrische Fehler erklärt:

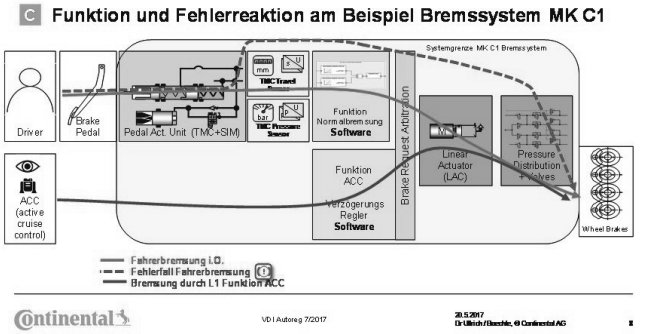


Bild 6: Funktion und Fehlerreaktion am Beispiel Bremssystem MK C1 Teil 2

In Grün ist die fehlerfreie Ausführung der normalen Fahrerbremsung als Wirkkette dargestellt, von links nach rechts: Der Fahrer betätigt das Bremspedal, ein in der MK C1 integrierter Hauptzylinder ist mit dem Pedal verbunden und sein Bremskolben wird bewegt. Dieser verschiebt Flüssigkeit in einen hydr. Pedalgefühlsimulator. Sensoren messen hierbei den Hauptzylinder Kolbenweg und den im Simulator erzeugten Druck. Aus diesen beiden Grössen wird in der Funktion „Normalbremsung“ die Höhe des Fahrerbremswunsches errechnet. Dieser gibt nun einem über büstenlosen Motor angetriebenem Hydraulikzylinder (LAC) den passenden zu erzeugenden Druck vor, welcher durch eine Gruppe von Raddruckregelventilen an die Radbremsen weitergegeben wird und das erwartete Bremsmoment sowie die gewünschte Fahrzeug Verzögerung verursacht. Somit ist der Regelkreis Fahrerbremswunsch => Fahrzeugverzögerung geschlossen.

Im Fehlerfall, gezeigt durch die rot gestrichelte Linie, sei angenommen, dass die Ansteuerung des Motors ausfällt und kein Druck aktiv erzeugt werden kann, oder dass z.B. durch Prozessorfehler die Abarbeitung der Software unterbrochen wird. Dann verbinden Aktuatorventile in ihrem stromlosen Zustand den Hauptzylinder anstelle mit dem Simulator direkt mit der Radbremse. Die Raddruckregelventile werden dabei durchströmt, und sind sie noch aktiv, kann die Blockierreihenfolge Vorderräder vor Hinterräder noch eingehalten

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

werden. Die rote Warnlampe muss dabei angesteuert werden (vgl Abschnitt B): Durch den Ausfall der Bremskraftverstärkung werden bei 500N Pedalkraft nicht mehr die erforderlichen 6,43m/s² Verzögerung erreicht, gleichwohl die vom Gesetz mindestens geforderten 2,44m/s² deutlich überschritten werden. Die MK C1 ist für diesen Zustand auf mindestens 4,88m/s² ausgelegt, also auf den doppelten gesetzlichen Wert.

Die blaue Linie zeigt den Ablauf einer durch die Funktion ACC (Active Cruise Control, also Abstandsregelsystem) ausgeführten Bremsung: Die Umfeldsensorik erkennt, dass das Fahrzeug zu verzögern ist weil es auf ein Hindernis zufährt. Dies erzeugt einen Bremswunsch, welcher an der Schnittstelle zum aktiven Teil des Bremssystems eingesteuert wird, und der LAC führt den entsprechenden Druckbefehl aus um an den Radbremsen das passende Bremsmoment zu erzeugen.
Zu dieser Funktion gibt es keine Degradation, sie ist gesetzlich nicht vorgeschrieben. Im Fehlerfall, z.B. bei Ausfall der Umfeldsensorik, wird die Funktion einfach stillgelegt. Diese Stilllegung wird dem Fahrer akustisch und optisch angezeigt und der Fahrer muss über eine Pedalbetätigung die erforderliche Bremsung vor dem Hindernis ausführen. Bei der Abstandsregelung handelt es sich um eine Funktion nach Stufe 1 der SAE Einordnung, der Fahrer muss jederzeit die Kontrolle behalten.

4: hauptsächliche Anforderungen Bremssysteme für SAE Stufe 3 -5

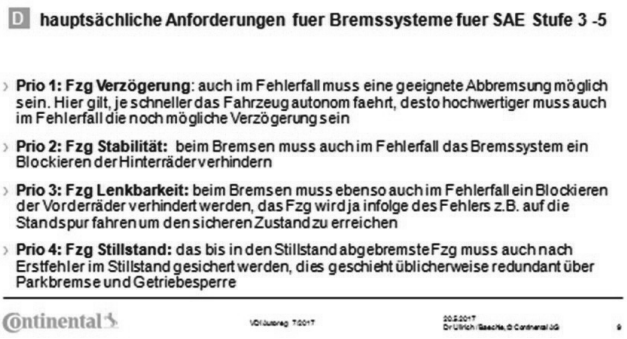


Bild 7: hauptsächliche Anforderungen Bremssysteme SAE Stufe 3-5 Teil 1

Ein Bremssystem welches ausschließlich vom Fahrer aktiviert wird, muss eine Redundanz aufweisen, sonst könnte der Fahrer ja nach einem Erstfehler nicht mehr abbremsen. Dies gilt selbstverständlich für vom Autopilot aktivierte Bremssysteme entsprechend und ist das

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

wichtigste Kriterium für jedes Bremssystem. Ist der Blockierschutz fuer Vorder- oder Hinterräder oder beide ausgefallen, übernimmt diese Aufgabe der Fahrer indem er die Pedalkraft reduziert. Ein Autopilot benötigt hier ein Bremssystem, welches den Regelkreis schliesst, d.h. aus Gründen der Fahrstabilität und Lenkbarkeit muss das Bremssystem auch im Fehlerfall eine ABS Funktion aufweisen. Steht das Fahrzeug, muss der Autopilot auch bei Teilausfall den Fahrzeug Stillstand unbegrenzt lange sichern können. Dies geschieht in der Regel über Parkbremse und Getriebesperre, oder aber über redundante Ansteuerung der Parkbremsen.

D hauptsächliche Anforderungen Bremssysteme SAE Stufen 3 -5

	Max. autonomous maneuver speed	No AD	<15 kph	<60 kph	up to 130 kph
	SAE HAD Level	L0 – L2	L2 – L4	L3 – L5	L3 – L5
	Autonomous Functions Examples	Assist Functions like ACC	Remote or Valet Parking	Traffic Jam Pilot	Cruising Chauffeur
Function availability & performance after severe Failure (High FITs)	Deceleration Legal Minimum (any single point failure)	2.44 m/s² (no AD: @ 500N)			
	Deceleration Performance	4 m/s² ~ 5m/s² @500N	s_{stop} < 5m @ 15kph s_{stop} < 1m @ 6kph	> 6.43 m/s²	> 9 m/s² high friction utilization
	Basic Vehicle Stability	Driver responsibility	No Hazard	Redundant Brake System avoids rear axle overbraking	
	Vehicle Steerability	Driver responsibility	No Hazard	Redundant Brake System avoids front axle overbraking	
	Parking / Roll-Off Prevention	Typically: IPB + GearLock (alternative: independent IPB left/right)			
	Driver Brake Control Authority	Driver can always take-over control unconditionally		Autopilot can always arbitrate driver's take-over request	
	Active Yaw Torque Control	Driver responsibility	Not required, Autopilot must drive carefully after failuire		

Continental VDI Autoreg 7/2017 20.5.2017 Dr Ulrich / Baechle, © Continental AG 10

Bild 8: hauptsächliche Anforderungen Bremssysteme SAE Stufe 3-5 Teil 2

Die Tabelle präzisiert die Anforderungen, die sich nicht nur nach der Stufe der Automatisierung richten sollen, sondern auch nach der Höhe der autonom gefahrenen Geschwindigkeit. Für selbst parkende Autos, z.B. langsame Fahrt im Parkhaus, wird kein Blockierschutz benötigt, und es wird ausreichen, z.B. als Redundanten Verzögerungsaktuator einfach die Parkbremsen zu aktivieren.

Zu erwähnen ist die Schnittstelle zwischen Fahrer und System im Autopilot Betrieb: Bis Stufe 3 wird ein Fahrerdurchgriff immer gewährleistet, soll doch der Fahrer bei Systemausfall entweder sofort übernehmen (<Stufe 2) oder geordnet während das System im degradierten Betriebsmodus noch arbeitet, aber den Fahrer zur Übernahme auffordert (Stufe 3). Ab Stufe 4 sollte der Autopilot auch nach Fehlerfall in der Lage sein, einen Fahrerwunsch gegen die vom Autopilot gewählte Fahrstrategie abzuwägen.

Eine aktive Fahrzeug Stabilisierung für z.B. abrupte Spurwechsel wird im Fehlerfall nicht mehr benötigt, der Autpilot wählt (entsprechend dem menschlichen Fahrer) bei ESP Ausfall eine vorrausschauende Fahrweise, welche notwendige ESP Eingriffe sicher vermeidet.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

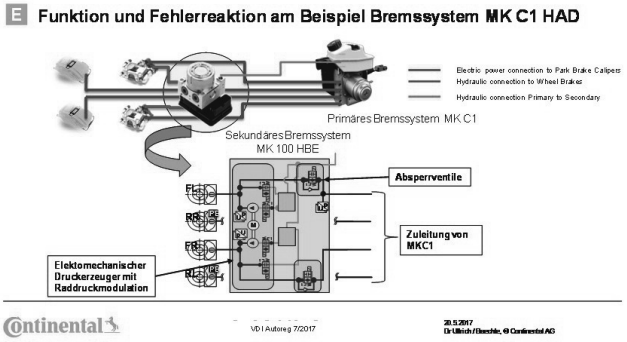


Bild 9: Funktion und Fehlerreaktion am Bremssystem MK C1 HAD Teil 1

Um die Redundanz Anforderungen erfüllen zu können, setzt Continental ein zweites Bremsregelsystem in die Zuleitung der MK C1 zu den Vorderradbremsen. Verwendet wird hier eine Variante aus der aktuellen elektronischen Bremssystem Generation MK100. Die beiden Steuergeräte werden an getrennte elektrische Bordnetze angeschlossen, ein gleichzeitiger Ausfall beider Systeme muss mit höchster Sicherheit vermieden werden um bei jedwedem denkbaren Einzelfehler das Fzg sicher verzögern zu können. Somit kann der Autopilot im Falle eines Fehlers in der MKC1 (primäres Bremssystem) auf das zusätzliche MK100 System (sekundäres Bremssystem) zugreifen. Dieses ist ebenso mit einer Druckmodulation ausgerüstet, um beim Bremsen durch Autopilot auch im Fehlerfall Fzg Stabilität und Lenkbarkeit sicherzustellen. In vielen Fällen kann dabei die MKC1 – sofern nicht vollständig stillgelegt – den von der MK 100 erzeugten Bremsdruck auf alle 4 Radbremsen verteilen.

https://doi.org/10.51202/9783181022824 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

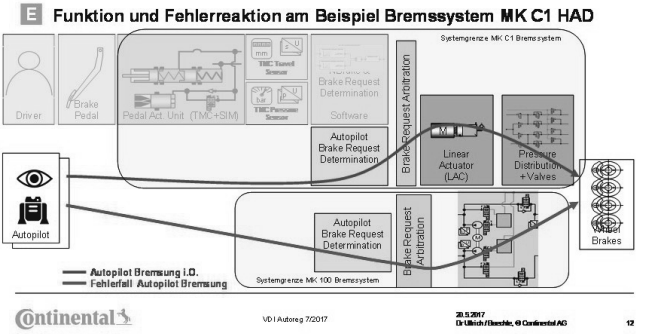


Bild 10: Funktion und Fehlerreaktion am Bremssystem MK C1 HAD Teil 2

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung nach ISO 26262 am Beispiel eines induktiven Valet Charging Systems

Dipl.-Ing. **Felix Reinbold**, Dr.-Ing. **Uwe Becker**,
Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik (iVA),
TU Braunschweig

Kurzfassung

Kerngedanke der ISO 26262 ist, die funktionale Sicherheit elektrischer/elektronischer Systeme in Kraftfahrzeugen durch die Beherrschung bzw. Vermeidung von Fehlfunktionen einer Sollfunktion herzustellen, die als sicher angenommenen wird. Aufgrund der zunehmenden Komplexität automatisierter Fahrfunktionen stellt sich inzwischen jedoch die Frage, wie die Sollfunktion zu spezifizieren ist, so dass die intendierte Funktionalität als ausreichend sicher betrachtet werden kann. Der vorliegende Beitrag stellt eine Methode zur Implementierung einer Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung nach ISO 26262 vor, die anhand generisch gefasster Betriebssituationen ein Sicherheitskonzept ableitet, das in gewissen Grenzen robust gegen eine sich ändernde, unvollständige oder fehlerhafte Systemspezifikation ist. Die Methode eignet sich insbesondere, um in frühen Projektstadien einen Rahmen für tiefergreifende Gefährdungsanalysen abzustecken. Das Beispiel eines induktiven Valet Charging Systems wird genutzt, um die Methode exemplarisch zu veranschaulichen.

Abstract

The core idea of ISO 26262 is to provide the functional safety of electrical/electronic systems in motor vehicles by controlling or avoiding malfunctions of an assumed safe target function. Due to the increasing complexity of automated driving functions, the question arises, how the target function has to be specified so that the intended functionality can be considered sufficiently safe. The present paper provides a method for the implementation of a hazard analysis and risk assessment according to ISO 26262 that is based on generically defined operational situations. A safety concept is derived that is - within certain limits - robust against changing, incomplete or faulty system specifications. The method is particularly suitable for setting a framework for deeper risk analyzes in early project stages. The example of an inductive valet charging system is used to illustrate the method.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1. Einleitung

Kraftfahrzeuge dürfen nach §3 Abs. 2 des Produktsicherheitsgesetzes nur dann auf dem Markt bereitgestellt werden, wenn bei bestimmungsgemäßer Verwendung die Sicherheit und Gesundheit von Personen nicht gefährdet wird. In der Richtlinie 2007/46/EG Artikel 29 zum Typengenehmigungsverfahren heißt es weiter, dass die Zulassung für Kraftfahrzeuge entzogen werden kann, wenn deren Betrieb ein erhebliches Risiko für die Sicherheit im Straßenverkehr darstellen. Die Bedeutung von Begriffen wie Risiko und Gefährdung, die Höhe des zulässigen Risikos sowie die nötigen Schritte zum Nachweis von Sicherheit gehen dabei nicht direkt aus den Gesetzen hervor. Vielmehr müssen sicherheitstechnische Normen herangezogen werden, die im Rahmen eines Risikomanagementprozesses die notwendigen Prozesse und Anforderungen zur Entwicklung eines sicheren Produktes beschreiben.

Für elektrische/elektronische Systeme in Kraftfahrzeugen wird der zu erbringende Sicherheitsnachweis auf Basis der speziell für die Automotive Domäne entwickelten funktionalen Sicherheitsnorm ISO 26262 geführt. Die ISO geht dabei grundsätzlich von der bestimmungsgemäßen Verwendung des Produktes oder dem vorhersehbaren Fehlgebrauch aus. Unvollständige oder fehlerhafte Spezifikationen, also ein unsicheres Verhalten der Sollfunktion selbst, werden in der ISO nicht betrachtet (siehe auch ISO 26262 – Teil 3 Scope und Abschnitt 7.4.2.1 [1]).

Vor dem Hintergrund der Produkthaftung ist dieses Vorgehen problematisch, da dort die Gebrauchssicherheit im Vordergrund steht. Es ist irrelevant, ob ein Schaden aufgrund einer fehlerhaften Sollfunktion oder durch eine fehlerhafte Spezifikation entstanden ist. Wichtig ist lediglich, dass die Gefährdung nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nicht vermieden werden kann. Aktuell wird bei der ISO deshalb unter dem Stichwort SOTIF (Safety of the Intended Functionality) im Subkomitee ISO/TC 22/SC 32 diskutiert, wie die Sollfunktion sicher ausgelegt werden kann [2]. Die Ergebnisse fließen in die Publicly Available Specification (PAS) 21448 ein, die sich momentan in der Vorbereitungsphase befindet. Ursache dafür ist, dass bei Fahrzeugautomatisierungsgraden ab SAE Level 3 [3] viele Risiken durch eine unvollständige oder fehlerhafte Spezifikation entstehen. Dies ist der mannigfaltigen Dimension des Szenarienraums geschuldet, der nach Wegfall des Fahrers von der Automatisierungsfunktion beherrscht werden muss.

Der vorliegende Beitrag stellt deshalb eine Methode zur Durchführung einer Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung (G&R) nach ISO 26262 vor, die sich auch dann anwenden lässt, wenn die Sollfunktion unvollständig oder nur anhand eines Use Case spezifiziert ist. Im Gegensatz zum üblichen Vorgehen einer G&R, bei dem der potentiell kritische Ausfall der sicheren Sollfunktion im Fokus steht, wird in der hier vorgestellten Methode das Szenario in

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

den Vordergrund gerückt. Dafür werden in Abschnitt 2 zunächst die der ISO 26262 zugrundeliegenden Begriffe und Konzepte erläutert, um ein einheitliches Verständnis für den Risikobegriff und die Risikobearbeitung zu schaffen. Des Weiteren werden Fragestellungen diskutiert, die sich typischerweise bei der Umsetzung der G&R ergeben. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 3 ein strukturiertes Vorgehen vorgestellt, das anhand generisch gefasster Betriebssituationen Rückschlüsse auf ein gefährliches Fahrzeugverhalten zulässt, dieses Verhalten mit einem Risikomaß bewertet und anschließend Sicherheitsmaßnahmen ableitet. Die Methode wird in Abschnitt 4 exemplarisch anhand eines induktiven Valet Charging Systems erläutert.

2. Grundlagen der Risikobearbeitung

Die Risikobearbeitung, je nach Quelle auch als Risikoanalyse bezeichnet [4], ist der Kernprozess einer jeden Norm, die sich mit dem Management von Risiken bzw. der funktionalen Sicherheit auseinandersetzt. Durch das automatisierte Fahren haben sich neue Herausforderungen an den Prozess der Risikobearbeitung ergeben, die im Folgenden kurz erläutert werden. Dafür werden zunächst die wichtigsten sicherheitstechnischen Begriffe vorgestellt, um anschließend auf den Prozess der Risikobearbeitung einzugehen. Darauf aufbauend werden die in der Praxis auftretenden Herausforderungen bei der Umsetzung des Prozesses thematisiert.

2.1 Risiko, Sicherheit und Gefährdung

Der Begriff des Risikos ist sehr weit gefasst und unterscheidet sich je nach Anwendungsgebiet stark. In [5] wurden insgesamt neun unterschiedliche Sichtweisen auf den Risikobegriff identifiziert. Im normativen Bereich haben sich jedoch zwei grundsätzlich Definitionen durchgesetzt, siehe auch DIN-Fachbericht 144 [6]. Die erste Definition adressiert das politische und unternehmerische Risiko, das neben den möglichen negativen Folgen einer Situation auch die positiven Effekte bewertet und gegeneinander aufwiegt. Dieser Sichtweise folgen insbesondere die ISO 31000 und der ISO Guide 73. Die zweite Definition zielt auf die Sicherheit technischer Systeme ab und es werden ausschließlich die möglichen negativen Folgen einer gegebenen Situation betrachtet. Dieser Sichtweise folgen insbesondere die Normen mit dem Fokus auf der funktionalen Sicherheit elektrischer/elektronischer Systeme (E/E-Systeme). Die Grundnorm IEC 61508 gilt dabei für alle E/E-Systeme; die speziell für die Automotive Domäne entwickelte ISO 26262 adressiert E/E-Systeme in Kraftfahrzeugen und zukünftig auch in Motorrädern [2].

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In der ISO 26262 ist das Risiko definiert als „die Kombination der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens mit der Schwere dieses Schadens“. Auf dem Begriff des Risikos aufbauend wird die **Sicherheit** als „die Abwesenheit unzumutbarer Risiken“ definiert. Unzumutbar bedeutet dabei, dass das Risiko ein vorab definiertes Grenzrisiko überschreitet und eine Gefahr für Leib und Leben von Personen besteht. Das Grenzrisiko ist implizit im „**Automotive Safety Integrity Level**“ (ASIL) inkludiert, welcher ein qualitatives Maß für das von einem gefährlichen Ereignis ausgehende Risiko darstellt. Der ASIL kann eine von insgesamt vier diskreten Stufen (A, B, C, D) annehmen und legt die Anforderungen an die Sicherheitsmaßnahmen fest, mit denen der Eintritt des gefährlichen Ereignisses vermieden bzw. beherrscht werden soll. A ist dabei die niedrigste und D die höchste Stufe. Ein gefährliches Ereignis entsteht, wenn ein technisches System – in der ISO als Item bezeichnet – in einer spezifizierten Betriebssituation ein fehlerhaftes Verhalten aufweist und dieses Ereignis negative Folgen auf die Gesundheit von Personen haben kann. Die den Schaden verursachende Quelle wird als **Gefährdung** bezeichnet. Die Gefährdung ergibt sich nach ISO 26262 aufgrund des fehlerhaften Verhaltens der nominalen Funktion auf Fahrzeugebene (z. B. ein ungewollt anfahrender PKW).

2.2 Phasen der Risikobearbeitung

Eine Gegenüberstellung der verschiedenen Normen in [6] zeigt, dass der Prozess zur Risikobearbeitung grundsätzlich auf denselben Konzepten und Strukturen aufbaut. Basierend auf der Systemdefinition werden die durch das System verursachten Gefährdungen analysiert, bezüglich ihres Risikos bewertet und, wenn erforderlich, das Risiko durch Sicherheitsmaßnahmen gemindert. Abb. 1 stellt die Risikobearbeitung nach ISO 26262 anhand dieser Struktur dar.

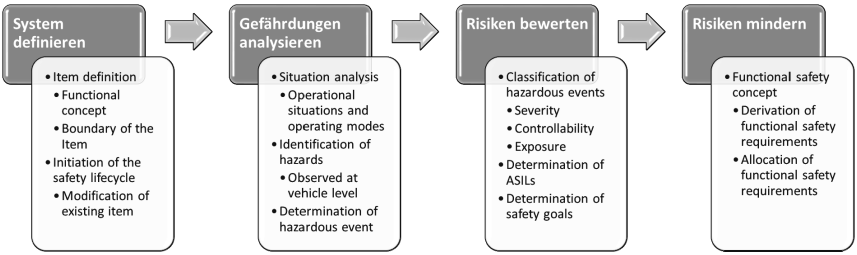


Bild 1: Phasen der Risikobearbeitung nach ISO 26262

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die weiß hinterlegten Boxen kennzeichnen einen Auszug der wesentlichen normativen Anforderungen zu den jeweiligen Phasen. Verfikations- bzw. Validierungsmaßnahmen und Iterationsschleifen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

2.3 Herausforderungen bei der Risikobearbeitung

Die Risikobearbeitung basiert auf Modellen von Ausschnitten der realen Welt, die zu Beginn der Analyse erstellt und anschließend anhand einer festen Methodik bezüglich ihrer Sicherheit beurteilt werden. Zur Erstellung dieser Modelle wird üblicherweise der bestimmungsgemäße Gebrauch des Systems in Form eines oder mehrerer Use Cases formuliert, anhand konkreter Szenarien bzw. Betriebssituationen ausgestaltet und anschließend die Sollfunktion designt. Gefährdungen, die bedingt durch einen Fehler in der Sollfunktion entstehen, werden anschließend in der G&R behandelt. Dieses Vorgehen ist in Hinblick auf voll- und hochautomatisierte Systeme mit einer Reihe neuer Herausforderungen konfrontiert, da

- aufgrund der vielfältigen Umgebungseinflüsse viele Gefährdungen durch eine fehlerhaft spezifizierte Sollfunktion entstehen. Insbesondere sogenannte „Black Swans“ [7], das sind Betriebssituationen, die sehr selten auftreten und ggf. nicht von der Sollfunktion beherrscht werden, müssen in Hinblick auf die Produktsicherheit ebenfalls behandelt werden.
- die Modelle der Automatisierungsfunktion so komplex sind, dass keine Aussagen über einen kausalen Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung einer Gefährdung getroffen werden können. Insbesondere beim Einsatz neuronaler Netze lässt sich die Kausalität zwischen Ursache und Wirkung eines denkbaren Schadens nicht mehr mit vertretbarem Aufwand nachweisen. Dem Begriff der Sicherheit wird damit der reale Sinn entzogen [6].
- die Modelle der Automatisierungsfunktion ständigen Änderungen unterliegen, sei es durch Softwareupdates oder durch selbstlernende neuronale Netze. Die Risikobearbeitung setzt aber ein statisches Modell voraus (Design Freeze), das nur innerhalb gewisser Grenzen modifiziert werden darf.
- es mit dem Wegfall des Fahrers immer schwieriger wird, Sicherheitsfunktionen zu definieren, die unabhängig von der die Gefährdung auslösenden Ursache wirken. Robuste Sicherheitsmaßnahmen, die in jeder Betriebssituation einen unsicheren Fahrzeugzustand erkennen und das Fahrzeug in den sicheren Zustand überführen („fail-safe“ zu „fail-operational“), werden sich voraussichtlich nicht durch einfach gestaltete Sicherheitsfunktionen realisieren lassen.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

- die große Anzahl an Betriebssituationen die Frage aufwirft, wie diese mit einem angemessenen Detaillierungsgrad erfasst werden können, ohne dass die Ergebnisse der G&R entweder unnötig komplex oder zu trivial werden.

Aktuell ist insbesondere die Absicherung neuronaler Netze ein interessantes Forschungsfeld, für das noch keine abschließende Lösung gefunden werden konnte.

3. Methode zur Durchführung einer Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung

Basierend auf den oben beschriebenen Herausforderungen wird die folgende Zielsetzung für die hier vorgestellte Methode formuliert:

- Betriebssituationen dürfen weder zu feingranular noch zu grob gefasst werden, damit eine aussagekräftige ASIL-Einstufung möglich ist.
- Gefährdungen, die sich aufgrund einer unsicheren Nominal-Funktion ergeben und im Rahmen der Risikobearbeitung angesprochen werden, müssen dokumentiert werden.
- Iterative Anpassungen des Use Case bzw. der Item Definition müssen einfach in die G&R integriert werden können.
- Die Methode muss einfach anwendbar sein und die sehr generischen Anforderungen der ISO 26262 konkretisieren.

Anhand dieser Ziele wurde die in Abb. 2 dargestellte Methode zur strukturierten Durchführung einer G&R mittels aufeinander aufbauender Tabellen entwickelt.

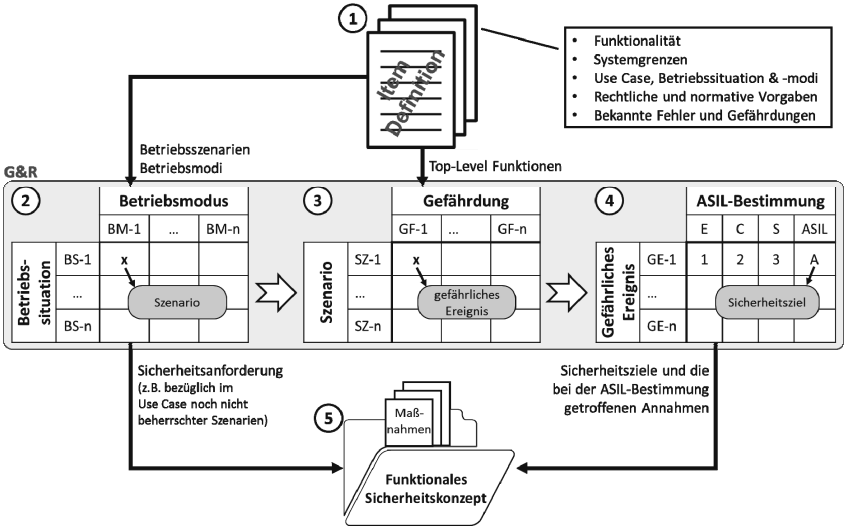


Bild 2: Aufbau der Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Das prinzipielle Vorgehen gleicht dem in [8], allerdings wurde die Ausgestaltung der einzelnen Phasen an die neuen Anforderungen angepasst. Der dargestellte Ansatz basiert auf insgesamt fünf Schritten: der Definition des Betrachtungsgegenstandes, der systematischen Erfassung potentiell kritischer Szenarien, der Ableitung von gefährlichen Ereignissen auf Fahrzeugebene, der Bestimmung eines ASILs für jedes gefährliche Ereignis und der Formulierung von Sicherheitsmaßnahmen.

Als Eingangsgrößen in die G&R dient die Item Definition (1), in der ein Use Case aufgestellt sowie die Betriebsmodi des Items beschrieben werden. Der Use Case formuliert einen Satz an Betriebssituationen, die durch die intendierte Funktion beherrscht werden müssen. Durch die Kombination aus Betriebssituation und Betriebsmodus des Items (2) ergeben sich die Szenarien, die durch das Item tatsächlich beherrscht werden. Wird eine Betriebssituation nicht beherrscht muss eine geeignete Sicherheitsanforderung formuliert werden. Die Szenarien werden anschließend mit den möglichen Fehlfunktionen (3) des Items verknüpft. Aus dieser Verknüpfung ergeben sich potentiell gefährliche Ereignisse, denen jeweils eine ASIL zugeordnet wird (4). Basierend auf den gefährlichen Ereignissen werden Sicherheitsziele (5) abgeleitet, die das Item erfüllen muss. Jedes Sicherheitsziel wird anschließend durch einen Satz an funktionalen Sicherheitsanforderungen (6) konkretisiert, welche wiederum durch auf die Architektur bezogene Sicherheitsmaßnahmen realisiert werden. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Phasen näher erläutert.

3.1 Item Definition

Im Vorfeld der G&R muss der in der Analyse zu betrachtende Gegenstand, in der ISO 26262 als Item bezeichnet, exakt festgelegt werden. Bei dem Item handelt es sich um die gesamte Wirkkette aus Sensoren, Reglern und Aktuatoren, die zur Ausführung der intendierten Funktion benötigt werden. Es gilt die Systemgrenzen, die Funktionsarchitektur, die Umgebungsbedingungen, die Betriebszustände, die anwendbaren Rechtsvorschriften, die bereits bekannten Gefährdungen etc. zu bestimmen und zu dokumentieren. Für die G&R sind dabei insbesondere die Betriebssituationen, die Betriebsmodi und die Funktionsarchitektur von Interesse. Häufig sind Missverständnisse, die im Laufe der G&R auftreten, auf eine unzureichende Definition dieser wesentlichen Punkte zurückzuführen.

Betriebssituationen

Alle relevanten Betriebssituationen, denen das Item im Betrieb ausgesetzt ist, müssen festgelegt werden und stellen den Kern der vorgestellten Methodik dar. Ein Grund dafür, dass es so schwierig ist, Betriebssituationen für hohe Automatisierungsgrade zu formulieren, ist die hohe Dimensionalität des Merkmalsraums, also die Vielzahl der die Betriebssituationen be-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

schreibenden Merkmale. Um den Merkmalsraum zu reduzieren, existieren diverse Methoden und Verfahren, insbesondere im Bereich der Testverfahren (Black-Box-Tests, am Schadensausmaß orientierte Tests etc.). Vor dem Hintergrund der zuvor aufgestellten Anforderungen wird hier der Ansatz verfolgt,

1) die Betriebssituationen anhand der den Schaden maßgeblich beeinflussenden Merkmale aufzubauen und anschließend
2) die den Schaden möglicherweise verursachenden Bedingungen zu ergänzen.

Im ersten Schritt werden die Schadensereignisse abgeleitet, die grundsätzlich innerhalb der Use Cases vorstellbar sind. Mögliche Quellen für Schadensereignisse und deren Randbedingungen bieten Unfalldatenbanken und -kataloge, Normen, Listen aus der Versicherungsbranche oder auch Expertenwissen und Brainstormings. Aufbauend auf den Schadensereignissen werden die den Schaden maßgeblich beeinflussenden Merkmale (physikalisch, elektrisch, thermisch etc.) bestimmt, auf messbare Größen heruntergebrochen und der Wertebereich der Größen in geeignete Quantisierungsstufen eingeteilt. Sowohl für die Merkmale als auch für die Quantisierungsstufen gilt, dass die Anzahl möglichst klein zu halten und am Use Case auszurichten ist. Die Dokumentation der potentiellen Schadensereignisse, der Merkmale und der Quantisierungsstufen erfolgt in Form eines Klassendiagramms unter Nutzung der Attributshierarchie nach [9]. Anschließend werden die einzelnen Merkmale und ihre Ausprägungen vollfaktoriell miteinander kombiniert, um einen festen Satz an Betriebssituationen zu formulieren. Zur Darstellung der Betriebssituationen kann auf eine beliebige Beschreibungssprache zurückgegriffen werden. Eine einheitliche, formale Beschreibungssprache auf Basis eines Klassendiagramms wird beispielsweise in [10] vorgestellt. Weitere Verfahren zur Darstellung finden sich auch in [11]. In der Praxis haben sich auch einfache Piktogramme zusammen mit einem kurzen erläuternden Text als effizient erwiesen, da die Betriebssituation von der Arbeitsgruppe mit einem Blick erfasst werden kann.

Im zweiten Schritt werden die den Schaden möglicherweise verursachenden Bedingungen ergänzt und die Betriebssituationen weiter verfeinert. Es ist anzumerken, dass die zu einer Gefährdung führenden Ursachen, insbesondere bei komplexen Systemen, sehr vielfältig sind und in ihrer Gänze niemals vollständig erfasst werden können. Bei der Erfassung der Ursachen ist es deshalb das Ziel, möglichst alle Schwächen, Einschränkungen und Grenzen in der Leistungsfähigkeit des Items zu dokumentieren, die während der Diskussion in der Expertenrunde identifiziert worden sind. Die Informationen liegen häufig schon in den an der Entwicklung beteiligten Fachabteilungen vor und müssen in der G&R an dieser Stelle zusammengeführt werden.

Betriebsmodi

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die verschiedenen Betriebsmodi sind vor der Durchführung der G&R einmalig zu definieren. Hierzu gehören beispielsweise sowohl der Bereitschaftsmodus und die Systeminitialisierung als auch unterschiedliche Degradierungsstufen wie z. B. vollautomatisiert und hochautomatisiert. Für jeden Use Case wird dabei ein eigener Satz an Betriebsmodi abgeleitet und anschließend in der G&R betrachtet.

Funktionsarchitektur

Für die G&R wird eine Liste an Top-Level-Funktionen benötigt, deren Versagen direkte Auswirkungen auf das Verhalten des Items hat. Der kausale Wirkzusammenhang zwischen den einzelnen Funktionen ist dabei nicht von Bedeutung, da lediglich das Top-Ereignis einer Ereigniskette mit Auswirkung auf das Gesamtfahrzeug benötigt wird. Bei der Formulierung der Funktionen ist darauf zu achten, diese nicht zu granular zu fassen und eine einheitliche Detaillierungstiefe zu erreichen.

3.2 Situationsanalyse

Ziel der Situationsanalyse ist es, das gewünschte Fahrzeugverhalten in einer gegebenen Betriebssituation zu definieren. Hierzu werden die Betriebssituationen mit den Betriebsmodi kombiniert. Eine schlüssige Kombination wird geeignet markiert und ergibt ein Szenario, das in die nächste Tabelle der G&R übernommen wird. Die Betriebsmodi gestalten die in der G&R zu betrachtenden Betriebssituationen weiter aus. Im Betriebsmodus „Erprobung/Freifahrt“ können Betriebssituationen mit wesentlich höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten auftreten als im Betriebsmodus „Serienbetrieb/Freifahrt“, da die Grenzen der Funktion erprobt werden sollen. Die in der G&R zu betrachtenden Szenarien unterscheiden sich dementsprechend bezüglich der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs.

Nicht jede Kombination muss zu einem Szenario führen. Beispielsweise ist es denkbar, dass die Grenzen der Leistungsfähigkeit des Items erreicht sind und das sich ergebende Szenario noch nicht im Use Case dargestellt werden kann. Dies ist entsprechend im Sicherheitskonzept zu vermerken. Es kann auch der Fall eintreten, dass die Betriebssituation nicht zum Betriebsmodus passt, z. B. Überholen auf einer induktiven Ladeplatte. Diese Kombination führt zu keinem gültigen Szenario und wird herausgefiltert.

3.3 Ableiten gefährlicher Ereignisse

Das gefährliche Ereignis beschreibt das fehlerhafte Verhalten einer Top-Level-Fahrzeugfunktion in einem gegebenen Szenario und führt nach einer gewissen Zeit zum Schaden, wenn es nicht durch den Fahrer oder anderweitig, z. B. durch eine Sicherheitsfunktion, kontrolliert wird. Die Fehlfunktionen auf Fahrzeugebene ergeben sich durch die Ver-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

knüpfung der Top-Level-Funktion mit geeigneten Leitworten. Jedes Leitwort beschreibt dabei eine mögliche Abweichung von der beabsichtigten Betriebsweise des Items. In DIN EN 61882 [12] wird die Verwendung detaillierter und auf einzelne Parameter des Systems bezogener Leitworte empfohlen. In [13] wird die Verwendung von vier Leitworten als ausreichend angesehen.

Die gefährlichen Ereignisse ergeben sich anschließend durch die Verknüpfung der Szenarien mit den Fehlfunktionen. Jedes sich durch die Verknüpfung ergebende potentiell gefährliche Ereignis wird in der entsprechenden Zelle mit einem Kreuz markiert. Je nach bewertetem Szenario kann eine Fehlfunktion aber auch keine schädlichen Folgen haben (stellt also keine Gefährdung dar) und muss somit nicht weiter betrachtet werden. Eine unbegründete Notbremsung ist beispielsweise folgenlos, wenn hinter dem Ego-Fahrzeug die Straße nicht befahren ist. Zellen, die unkritische Ereignisse zur Folge haben, werden ausgegraut und eine entsprechende Begründung hinterlegt.

3.4 ASIL Bewertung

Jedem identifizierten gefährlichen Ereignis wird anschließend ein ASIL zugeordnet. Bei sehr geringem Risiko erhält das Gefährliche Ereignis keine ASIL-Einstufung. Es reicht dann aus, nach den in einem Qualitätsmanagement (QM) vorgegebenen Prozessen zu entwickeln. Grundlage für die Bestimmung des ASIL bildet ein in der ISO 26262 hinterlegter Risikograph. Anhand der drei Parameter „Schwere“, „Eintrittswahrscheinlichkeit“ und „Kontrollierbarkeit“ wird der ASIL festgelegt. Jeder Parameter wird dabei anhand einheitlicher Regeln durch eine Experteneinschätzung bestimmt und zusammen mit einer kurzen Begründung in der Tabelle dokumentiert. Die bei der ASIL-Einstufung getroffenen Annahmen, z. B. bezüglich der Leistungsfähigkeit des Fahrers, müssen ebenfalls dokumentiert werden.

Für jedes gefährliche Ereignis mit einer ASIL-Einstufung wird anschließend ein Sicherheitsziel formuliert. Diese bilden die Grundlage für das im Anschluss zu erstellende funktionale Sicherheitskonzept. Sicherheitsziele sind unabhängig von der Implementierung des Items und formulieren grobe Schutzziele. In der Regel wird gefordert, dass das gefährliche Ereignis beherrscht wird (z. B. durch den Fahrer). Es kann jedoch auch gefordert werden, dass der Eintritt des gefährlichen Ereignisses vermieden wird, oder dass die Auswirkungen des gefährlichen Ereignisses gemindert werden.

3.5 Erstellen des funktionalen Sicherheitskonzepts

Das funktionale Sicherheitskonzept leitet für jedes Sicherheitsziel funktionale Sicherheitsanforderungen ab und ordnet diese den vorläufigen Systemelementen in Form konkreter Maß-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

nahmen zu. Es bündelt auch alle sonstigen Annahmen, die z. B. während der ASIL-Bestimmung getroffen worden sind. Die Maßnahmen können dabei funktionaler oder non-funktionaler Natur sein. Unter den non-funktionalen Maßnahmen werden z. B. organisatorische oder Maßnahmen nicht elektrotechnischer Natur verstanden. Non-funktionalen Maßnahmen wird kein ASIL zugeordnet; die ASIL-Einstufung baut auf ihnen auf und sie sind deshalb in der Regel verpflichtend. Das funktionale Sicherheitskonzept wird anschließend in Teil 4 der ISO 26262 weiter verfeinert.

4. Exemplarische Anwendung auf ein induktives Valet Charging System

Aufgrund des Umfangs der vollständigen Analyse kann an dieser Stelle in Abb. 3 nur ein kurzer exemplarischer Auszug der ASIL Bewertung gezeigt werden. Weitere Beispiele finden sich im Foliensatz zu dieser Veröffentlichung.

Use Case	Szenario		Gefährliches Ereignis		Schadensszenario		ASIL		Safety Goal (SG)	
ID	Beschreibung	E	Beschreibung	C	Beschreibung	S	ID		ID	Beschreibung
	 Laden auf Ladeplatte. Ladeplatte größer als Fahrzeug. Personen laufen auf die Ladeplatte.		 Ladung wird nicht unterbrochen und Person ist zu hohen Feldstärken ausgesetzt		 Genauen Schäden werden aktuell in DKE-Arbeitskreis diskutiert, noch zu klären		GE01			
Ausbaustufe 1 (AS01)	Laden mit 60 KW	2	Fahrer muss die Ladung überwachen. Unterbrechen der Ladung durch Fahrer über Schalter "Ladung Stop".	1	Selbst bei Metallimplantaten keine Erwärmungen spürbar; es wurde hier eine sehr konservative Schätzung getroffen.	2	GE01_AS01	QM		
Ausbaustufe 2 (AS02)	Laden mit 200 KW	2	Fahrer muss die Ladung nicht überwachen.	3	Selbst bei Metallimplantaten keine Erwärmungen spürbar; es wurde hier eine sehr konservative Schätzung getroffen.	2	GE01_AS02	A	SG-010	Vermeiden, dass Personen zu hohen Feldstärken (> 27 uT) ausgesetzt sind

Bild 3: Auszug aus der G&R eines induktiven Valet Charging Systems

5. Zusammenfassung

Die vorgestellte Methode für eine Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung beschreibt einen klar strukturierten Prozess, wie sich basierend auf der Item Definition ein funktionales Sicherheitskonzept ableiten lässt. Durch die Fokussierung auf die einen Schaden kennzeichnenden Merkmale bei der Erstellung der Betriebssituationen konnte der Szenarienraum stark reduziert werden. Lediglich wenn die Arbeitsgruppe dies wünscht, wird die Ursache einer Gefährdung in der Betriebssituation mit aufgenommen. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn für bekannte Schwachstellen der Nominal-Funktion Sicherheitsmaßnahmen abgeleitet werden sollen. Für die Absicherung der Hoch- und Vollautomatisierung mit der vorgestellten Methode müsste die SOTIF-Thematik jedoch noch stärker in der Analyse fokussiert werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literaturverzeichnis

[1] ISO 26262-3: Straßenfahrzeuge - Funktionale Sicherheit - Teil 3: Konzeptphase. Berlin: Beuth Verlag 2011

[2] Nowak, C.: ISO 26262:2018 – Ein Ausblick auf die 2nd Edition. Safe.tech 2017

[3] SAE J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. SAE International 2016

[4] Grimvall, G. G., Holmgren, Å. J., Jacobsson, P., Thedéen, T.: Risks in Technological Systems. London: Springer Verlag 2010

[5] Aven, T.: The risk concept — historical and recent development trends. Reliability Engineering & System Safety, Volume 99, 2012, P 33–44

[6] DIN-Fachbericht 144: Sicherheit, Vorsorge und Meidung in der Technik. Berlin: Beuth Verlag 2005

[7] Aven, T.: Implications of black swans to the foundations and practice of risk assessment and management. Reliability Engineering & System Safety, Volume 134, 2015, P. 83–91

[8] Reinbold, F., Stein, C., Becker, U., Schnieder, E.: Integration von Sicherheitsaspekten in die Entwicklung moderner Fahrerassistenzsysteme. Tagungsband des 12. Braunschweiger Symposiums AAET 2011, Braunschweig: 2011

[9] Schnieder, E., Schnieder, L.: Verkehrssicherheit – Maße und Modelle, Methoden und Maßnahmen für den Straßen- und Schienenverkehr. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2013

[10] Wittmann, D., Wang, C., Diermeyer, F.: Methodische Definition von sicherem Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge. 32. VDI/VW Gemeinschaftstagung, 2016

[11] Winner, H., Wachenfeld, W., Junietz, P.: Neue Anforderungen an Testverfahren und Integrationstools für automatisiertes Fahren. 32. VDI/VW Gemeinschaftstagung, 2016

[12] DIN EN 61882: HAZOP-Verfahren (HAZOP-Studien) - Anwendungsleitfaden (IEC 61882:2016); Deutsche Fassung EN 61882:2016. Berlin: Beuth Verlag 2017

[13] Leveson, N. G.: Engineering a Safer World – Systems Thinking Applied to Safety. Cambridge, London: MIT Press 2012

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Entwicklung eines fail-operational Bordnetzes für autonomes Fahren

Dr.-Ing. **Ahmet Kilic**, M.Sc. **Tunan Shen**, Dipl.-Ing. **Kirill Gorelik**,
Robert Bosch GmbH, Renningen

Kurzfassung

Autonomes Fahren ist ein neuer Markt und erfordert fail-operational Teilsysteme und Komponenten zur Erfüllung höchster Sicherheitsanforderungen. Eine Möglichkeit für die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen ist redundante Systemauslegung. Da dies bei Fahrzeugen aus Kosten-, Bauraum- und Gewichtsgründen nicht immer möglich und optimal ist, werden neue Systemarchitekturen benötigt. Ein fehlertolerantes elektrisches Bordnetz ist eine notwendige Voraussetzung für die Einführung vom autonomen Fahren. In diesem Beitrag werden Konzepte zur Entwicklung von fehlertoleranten Bordnetzen für autonomes Fahren dargestellt und an konkreten Beispielen verdeutlicht. Gesetzliche Anforderungen, die eine hohe Relevanz für das Design des Bordnetzes haben, werden im zweiten Abschnitt dieses Beitrags dargestellt. Im dritten Teil werden unterschiedliche Topologien für ein fehlertolerantes Bordnetz beschrieben und ihre Eignung für den Einsatz für autonomes Fahren bewertet. Im vierten Teil werden die durchgeführten Simulationen vorgestellt, die die Auslegung und die Absicherung vom Bordnetz ermöglichen. Die Vorstellung einer Betriebsstrategie, die zur Steuerung des fehlertoleranten Bordnetzes benötigt wird, rundet diesen Beitrag ab.

Abstract

Automated driving is a new market and requires fail-operational subsystems and components enabling the highest required safety level. One possibility to fulfill these requirements is designing a redundant system. Since such a design is not always possible and optimal in a vehicle due to the cost, size and weight factors, new system architectures are needed. A fail-operational electrical power net is a main prerequisite for introducing automated driving. This paper presents the concepts for developing fail-operational power nets for automated driving. In the second section, legal requirements with high impact on the design of power net architectures will be presented. In the third section, different topologies for fault tolerant power nets are described and their use for automated driving is evaluated. In section four, the simulations done for dimensioning and validation will be presented. In the last section, an operational strategy controlling the fault tolerant power net will be presented.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1. Einleitung

Heutige Brems- und Lenksysteme im Fahrzeug sind für einen fail-safe Betrieb ausgelegt, da der Fahrer immer eine Rückfallebene darstellt. Sollte im Fahrzeug eine sicherheitskritische Komponente wie beispielsweise Bremse ausfallen, muss der Fahrer mithilfe seiner Muskelkraft durch Betätigung des mechanischen Bremsdurchgriffs das Fahrzeug zum Stillstand bringen. Beim autonomen Fahren sollte der Fahrer nicht mehr in der Lage sein, die Fahrzeugführung zu übernehmen. Somit sollte das autonom fahrende System trotz Fehler (ggf. eingeschränkt) funktionieren. Um solche fehlertolerante Funktionalität sicherzustellen, erfordert autonomes Fahren redundante Konzepte für Teilsysteme und Komponenten zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen. Ein Ausfall der elektrischen Versorgung im autonom fahrenden Fahrzeug kann zu lebensgefährlichen Situationen führen, da alle Verbraucher im heutigen Bordnetz beim Verbrennerfahrzeug nur durch einen Energieerzeuger (Generator) und einen Energiespeicher (12V Batterie) versorgt werden. Wenn die elektrische Energiequelle aufgrund eines Fehlers im Generator ausfällt, können die restlichen Fahrzeugkomponenten nur noch für eine kurze Zeit durch die Batterie versorgt werden. Nach einer bestimmten Zeit ist die Batterie entladen und das gesamte autonom fahrende System fällt aus. Deshalb ist ein fehlertolerantes elektrisches Bordnetz eine notwendige Voraussetzung für autonomes Fahren.

2. Anforderungen

Um ein hochzuverlässiges elektrisches Bordnetz für autonomes Fahren zu realisieren, müssen die relevanten Anforderungen analysiert werden. Obwohl bis heute keine gültigen Normen und Gesetze bekannt sind, können aus der Analyse der heutigen Normen und Gesetze für Fahrerassistenzsysteme die potenziellen Anforderungen an das autonome Fahren abgeleitet werden. Darüber hinaus müssen auch die Kundenanforderungen an das autonome Fahren betrachtet werden.

Bremssystem

Die Regelung ECE R13-H stellt die einheitlichen Bedingungen für die Genehmigung von Personenkraftwagen hinsichtlich der Bremsfunktionalität dar. Diese Regelung gilt für Personenkraftwagen mit einer Höchstgeschwindigkeit größer als 25 km/h und fordert mindestens zwei voneinander völlig unabhängige Energiespeicher mit je einer eigenen unabhängigen Übertragungseinrichtung .

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Beim autonomen Fahren gibt es keinen Fahrer oder der Fahrer sollte nicht in der Lage sein, die Steuerung des Fahrzeugs zu übernehmen. Die Anforderungen an das Bremssystem müssen mindestens genauso hoch sein wie die Anforderungen an die fremdgesteuerte Bremsanlage. Das bedeutet, dass im autonom fahrenden Fahrzeug zwei unabhängige Bremssysteme (bestehend aus Steuergerät, Aktoren und Energieversorgung) eine redundante Bremsfunktion gewährleisten müssen. Jedes Bremssystem sollte selbstständig die in ECE R13-H geforderte Verzögerung erfüllen. Darüber hinaus muss die Bordnetz-Topologie zweikanalige Struktur aufweisen, d.h. aus zwei unabhängigen Bordnetzkanälen bestehen. Jeder Bordnetzkanal zur Versorgung der zweikanaligen elektrischen Bremse muss außerdem über einen völlig unabhängigen elektrischen Speicher verfügen.

Lenksystem

Die Lenkung ist ebenso wie die Bremse eine sicherheitsrelevante Komponente. Für die Lenkanlagen gilt die Regelung ECE R79, die aber keine Lenkanlagen für den Einsatz in autonom fahrenden Fahrzeugen, autonome Lenkanlagen, abdeckt. Jedoch kann man aus den Anforderungen für die Fremdkraftlenkanlagen ableiten, dass eine autonome Lenkanlage mindestens genauso ausfallsicher wie eine konventionelle Lenkung sein muss. Den entsprechend Nachweis der Ausfallsicherheit muss der Hersteller erbringen.

Wird ein Fahrzeug von der Geradeausfahrt in eine Spirale mit einer Geschwindigkeit von 10 km/h gefahren, so muss bei einer intakten Lenkanlage innerhalb von 4 Sekunden bei einer maximalen Betätigungskraft von 300 N die Stellung der Betätigungseinrichtung einen Wendekreisradius von 20 m entsprechen . Dieses Leistungsniveau muss auch bei einem Ausfall der Energiequelle der Steuer-Übertragungseinrichtung bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h eingehalten und es müssen mindestens 24 „Achten“ mit einem Bahndurchmesser von 40 m gefahren werden können . Bei einer Störung in der Energie-Übertragungseinrichtung muss das Leistungsniveau eingehalten werden, auch nachdem mindestens 25 „Achten“ mit einem Bahndurchmesser von 40 m bei einer Mindestgeschwindigkeit von 10 km/h gefahren worden sind .

Für autonom fahrende Fahrzeuge kann man annehmen, dass autonome Lenkanlagen ohne Unterstützung des Fahrers im Fehlerfall die Vorschriften der Regelung ECE 79 erfüllen müssen. Die Funktionalität der Lenkung muss durch eine redundante Auslegung der Komponente gewährleistet werden. Darüber hinaus sollte der Energievorrat des Bordnetzes ausreichend für die definierten Lenkmanöver sein.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Sensoren

Es gibt bis heute noch keine Regelungen oder gesetzliche Anforderungen für redundante Sensoren. Aus technischer Sicht wird ein mehrfach redundantes Sensorsystem bei fast allen ADAS (**A**dvanced **D**river **A**ssistance **S**ystem) und autonom fahrenden Systemen für ein sicheres Erkennen des Umfelds verwendet. Die Notwendigkeit sowie Vorteile vom Einsatz mehrfacher Redundanz zur Erkennung des Umfelds werden in beschrieben. Zum einem kann über die Datenfusion der Sensorik, die Informationen über dasselbe Objekt liefern, die Güte der Objekterkennung verbessert werden. Zum anderen kann durch die Redundanz die Fehlertoleranz beziehungsweise die Verfügbarkeit des Systems erhöht werden. Fällt ein einzelner Sensor aus, so können dem System immer noch mit genügender Qualität Informationen zur Verfügung gestellt werden, die für den Übergang des Fahrzeugs in den sicheren Zustand erforderlich sind. Da ein Ausfall der Energieversorgung sofort zum Ausfall der Sensorik führen wird, müssen mindestens zwei unabhängige Energieversorgungen zur Verfügung stehen. Ein einzelner Fehler darf nicht zum totalen Ausfall der Sensoren führen.

Bordnetz

Wie bereits beschrieben erfordert die Brems- und Lenkfunktionalität sowie die Sensorik zur Umfelderkennung beim autonomen Fahren eine sichere Energieversorgung. Für ein Bremssystem werden in der Regelung ECE R13-H zwei völlig unabhängige Energiespeicher und unabhängige Energie-Übertragungseinrichtungen gefordert. Somit hat das System nach einem Einzelfehler in der Energieversorgung noch ausreichend Reserven, um das Fahrzeug rechtzeitig in den sicheren Zustand zu bringen. Zudem muss das Lenksystem nach einem Ausfall der Energieversorgung noch das angeforderte Leistungsniveau erbringen. Somit ist ebenfalls eine Redundanz im Energieversorgungssystem erforderlich. Die Auslegung der Energiespeicher im jeweiligen Kanal muss so erfolgen, dass die gesetzlichen Anforderungen bezüglich der aufzubringen Bremskraft und durchzuführender Lenkmanöver erfüllt sind.

Kundenanforderungen

Wenn ein Fehler während des Fahrens auftritt, so muss das Fahrzeug in den sicheren Zustand überführt werden. Dabei können unterschiedliche Szenarien, sogenannte **S**afe **S**top **L**evels (SSL), definiert werden. Beispiele von möglichen Szenarien zum Übergang in den sicheren Zustand sind in Bild 1 dargestellt. Das Erreichen eines sicheren Zustandes hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, wie beispielsweise dem erforderlichen Energiebedarf zum Übergang in den sicheren Zustand sowie der Verfügbarkeit der Aktoren und Sensoren.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

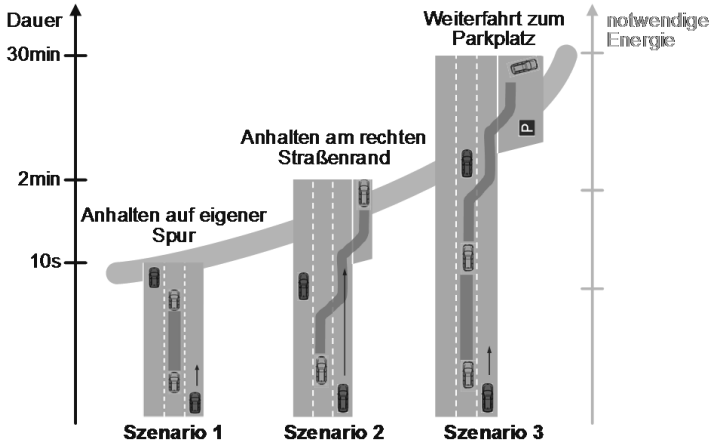


Bild 1: Unterschiedliche Safe Stop Levels

Beim ersten Szenario in Bild 1 soll das Fahrzeug innerhalb einer kurzen Zeit zum Stillstand auf eigener Spur gebracht werden. Für diesen Fall muss die Bremsfunktionalität für den fail-operational Betrieb ausgelegt sein, die Antriebs- und Lenkfunktionalität werden für den Übergang in den sicheren Zustand nicht benötigt. Szenario 2 erfordert fail-operational Betrieb vom Brems- und Lenksystem, um das Fahrzeug am rechten Straßenrand zum Stillstand zu bringen. Um eine Weiterfahrt bis zum nächsten Parkplatz zu ermöglichen, wie es im Szenario 3 dargestellt ist, muss die Brems-, Lenk- und Antriebsfunktionalität für den fail-operational Betrieb ausgelegt werden.

Bei der Wahl des Szenarios für den Übergang in den sicheren Zustand spielen Kundenanforderungen eine große Rolle. Je nach OEM (**O**riginal **E**quipment **M**anufacturer) müssen das System und entsprechende Komponenten für den angeforderten Übergang in den sicheren Zustand ausgelegt sein. Der Anforderungstrend geht in die Richtung einer möglichst langen Weiterfahrt.

3. Bordnetz-Topologien für autonomes Fahren

Ein Energiebordnetz ist das Energieversorgungssystem im Fahrzeug. Es besteht aus elektrischen Verbrauchern, elektrischer Energieerzeuger, elektrischer Energiewandler und Energiespeicher sowie den Verbindungen zwischen diesen Komponenten.

In Bild 2 ist das klassische 12V Bordnetz dargestellt. Dieses Bordnetz besteht aus einem Starter (S), einem Generator (G), einer Batterie (B_B), aus sicherheitskritischen Verbrauchern

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

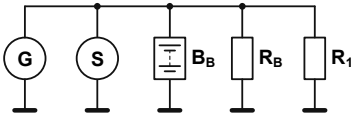


Bild 2: klassisches 12V-Bordnetz

R_1 (z.B. Bremse, Lenkung, …) und aus nicht sicherheitskritischer Verbraucher R_B (z.B. Klimakompressor, Radio, …). Heutzutage sind alle Verbraucher mit einem einzigen Speicher und einem einzigen Energieerzeuger verbunden. Wenn die Energiequelle oder der Energiespeicher ausfällt, sind alle elektrischen Komponenten im Bordnetz (inkl. Lenkung und Bremse) nicht mehr funktionstüchtig. Im Fehlerfall muss der Fahrer mit seiner Muskelkraft durch Betätigung des mechanischen Brems- und Lenkdurchgriffs das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführen. Die derzeit verwendeten Bordnetz-Topologien im Automobilbereich erfüllen die Anforderungen des autonomen Fahrens bezüglich der Fehlertoleranz der elektrischen Versorgung nicht.

Wie in Kapitel 2 bereits beschrieben, muss die Energieversorgung des Bremssystems nach der Regelung ECE R13-H aus einer zweikanaligen Struktur bestehen, damit das Fahrzeug im Fall des Ausfalls von einem Bordnetzkanal durch die Redundanz im Bremssystem und der Energieversorgung sicher angehalten werden kann. Auch die Funktionalität des Lenksystems sowie der Sensorik zur Umfelderkennung sollte beim Ausfall von einem Bordnetzkanal weiterhin gewährleistet sein, was ebenfalls redundante Versorgung erfordert. Basierend auf den oben genannten Anforderungen müssen neue Bordnetztopologien entwickelt werden.

Mehrspannungsbordnetz-Topologie

Eine Mehrspannungsbordnetz-Topologie ist in Bild 3 dargestellt. Dieses Bordnetz besteht aus einem 48V Generator, einer 48V (B_2) und 12V (B_B) Batterie, sicherheitsrelevanter Verbraucher in 48V (R_2) und 12V (R_1) Teilbordnetzen sowie Komfortverbraucher (R_B). Der Einsatz der 48V Spannungsebene ermöglicht die redundante Versorgung der sicherheitsrelevanten Komponenten auf zwei Spannungsebenen. Die dazu gehörenden Komponenten werden teilweise durch das 48V Bordnetz versorgt. Allerdings sind heutzutage noch keine 48V Lenk- oder Bremssysteme auf dem Markt verfügbar. Um die Redundanz in einer solchen Topologie zu ermöglichen, müssen die 48V Komponenten neu entwickelt werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

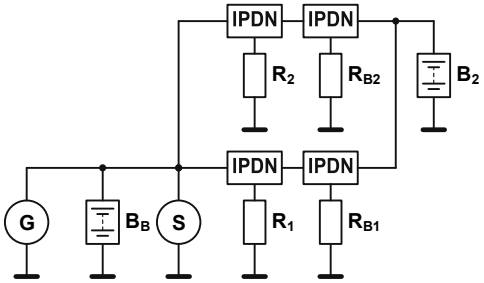


Bild 4: Ring-Bordnetz

Ring-Topologie

Eine weitere Topologie ist die Ring-Topologie , die in Bild 4 dargestellt ist. Ein Energiespeicher befindet sich jeweils im vorderen (B_B) und im hinteren (B_2) Teil des Fahrzeugs. Die Verbraucher sind in vier Gruppen unterteilt (sicherheitskritische Verbraucher R_1 und R_2, Komfortverbraucher R_{B1} und R_{B2}) und über vier IPDNs (**I**ntelligent **P**ower **D**istribution **N**odes) verbunden. Jede IPDN verfügt über zwei Schalter, die ein Zu- oder Abschalten der Energiequellen oder der Nachbargruppen ermöglichen. Im normalen Betrieb werden alle Verbraucher von beiden Energiequellen versorgt. Bei Ausfall der vorderen Batterie wird diese von den Verbrauchern getrennt. Diese Topologie verfügt über zwei unabhängige Energiespeicher, die Forderung nach zwei unabhängigen Übertragungseinrichtungen wird jedoch nicht erfüllt. Darüber hinaus erfordert diese Ringtopologie eine große Änderung im heutigen Bordnetz.

Baum-Topologie

Die Baum-Topologie ist in Bild 5 abgebildet. Der größte Vorteil dieser Topologie besteht darin, dass diese Topologie eine Add-On Lösung zum heutigen Bordnetz darstellt. Diese Topologie besteht aus einem Generator (G),einem Starter (S), zwei 12V Batterien (B_B und B_2), aus sicherheitskritischen Verbrauchern (R_1 und R_2) und Komfortverbrauchern (R_B).

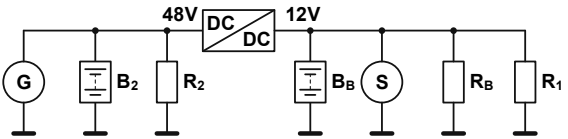


Bild 3: Mehrspannungsbordnetz

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

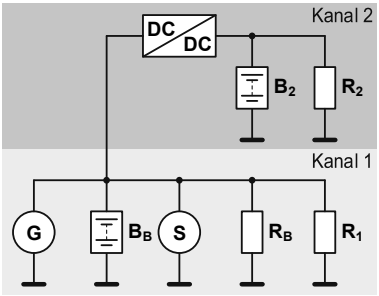


Bild 5: 12V-Baum-Bordnetz

Durch einen 12/12V DC/DC Wandler wird ein zusätzlicher Kanal mit dem Basisbordnetz (Kanal 1) verbunden. Im Fehlerfall kann der Wandler die beiden Kanäle entkoppeln. Die Verbraucher werden dann von der Batterie des jeweiligen Kanales versorgt. Dadurch führt ein Fehler nicht zu einem Ausfall beider Kanäle.

Darüber hinaus ist die Baum-Topologie für verschiedene Fahrzeugtypen und Spannungsebenen geeignet. In Bild 6 sind skalierbare Bordnetz-Topologien für unterschiedliche Spannungsklassen (48V und HV) dargestellt.

In diesem Fall ändert sich lediglich eine Spannungsebene von Hochvolt (HV) auf 48V. Die 48V und 12V Teilnetze besitzen eine gemeinsame Masseverbindung und sind daher im Gegensatz zu den HV/12V Bordnetzen galvanisch gekoppelt. Die dargestellten 12V, 48V sowie HV Baum-Topologien erfüllen die Vorgaben der Regelung ECE R13-H.

4. Simulation

Nach der Bestimmung der Topologie müssen die entsprechenden Bordnetz-Komponenten,

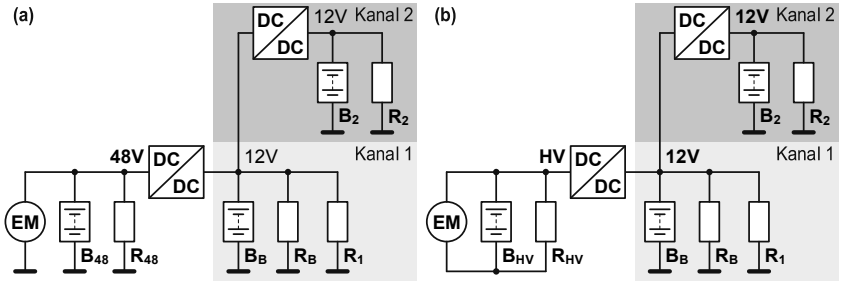


Bild 6: (a) 48V/12V-Baum-Bordnetz, (b) HV/12V-Baum-Bordnetz

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

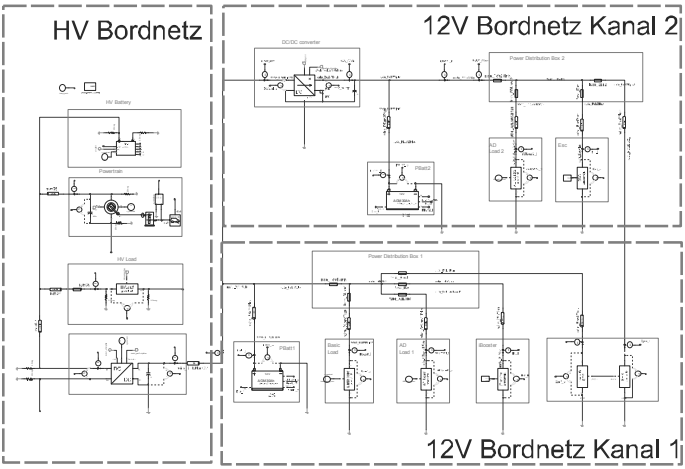


Bild 7: Überblick über Saber Simulationsmodell für ein rein elektrisches Fahrzeug

wie DC/DC Wandler und Batterie, ausgelegt werden. Mithilfe einer elektrischen Simulation des Bordnetzes wird der Auswahlprozess der Bordnetzkomponenten beschleunigt.

Das Ziel der Simulation ist die Dimensionierung und Auswahl der Bordnetzkomponenten, damit die Energieversorgung für sicherheitsrelevante Komponenten gewährleistet ist. Außerdem muss beachtet werden, dass der Ladezustand des Energiespeichers nach einer Fahrt hoch genug ist, damit die Batterie beim nächsten Start genügend Leistung besitzt um das Fahrzueg zu starten. Weiterhin muss die Verfügbarkeit des Bordnetzes auch im Fehlerfall nachgewiesen werden. D.h. es muss gezeigt werden, dass die Funktionalität der sicherheitsrelevanten Komponenten nach einem Fehler im Bordnetz noch gewährleistet ist.

Die elektrische Simulation wird in Saber durchgeführt. Das elektrische Verhalten der Energieerzeuger, Energiespeicher und Verbraucher wird modelliert. Die Modelle werden danach mit Komponenten der Firma Robert Bosch GmbH validiert. Die Verbraucher werden nach Basislast, Bremssystem, Lenksystem und AD Lasten (Sensoren und Steuergerät für **A**utonomous **D**riving) gruppiert. Es werden Ladebilanz-, Spannungsstabilitäts- sowie Fehlersimulationen durchgeführt, die nachfolgend beschrieben werden. In Bild 7 ist ein Simulationsmodell der Baumtopolgie für ein rein elektrisches Fahrzeug dargestellt.

Ladebilanz

Bei einer Ladenbilanzsimulation werden die Energieflüsse in dem Bordnetz für die Dauer von einem Fahrzyklus simuliert. Das Verhalten der Verbraucher ist je nach Jahreszeit und

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Tageszeit unterschiedlich. Außerdem ist das Strom-Spannungsverhalten der Batterie von der Umgebungstemperatur abhängig. Daher werden die Lastprofile der elektrischen Verbraucher, insbesondere der großen Energieverbraucher, bei verschiedenen Umweltszenarien betrachtet. Hier wird nur die mittlere Leistung der Verbraucher berücksichtigt. Das dynamische Verhalten der Verbraucher und der Energiequelle wird vernachlässigt. Die Anforderungen an die Nennleistung des DC/DC Wandlers und an die Kapazität der 12V Batterie werden anhand der Simulationsergebnisse abgeleitet.

Spannungsstabilität

Bei der Spannungsstabilitätssimulation wird das Verhalten hochdynamischer Verbraucher, wie z.B. der elektrischen Bremse und Lenkung, berücksichtigt. Das Ziel ist es, die Energiespeicher und die Energiequelle so auszulegen, dass sicherheitsrelevante Komponenten bei hoch dynamischen Fahrsituation immer noch funktionieren. Die Spannungsstabilität ist gegeben solange die Spannung sich innerhalb der spezifizierten Grenzen für die Komponenten befindet. Die Verletzung der Spannungsstabilität wird bei der Überlagerung von kritischen Umweltszenarien mit hochdynamischen Fahrsituationen untersucht. Tritt bei der Spannungsstabilitätsimulation in einem Bordnetzkanal eine Unter- oder Überspannung auf, so wird angenommen, dass die Komponenten in diesem Kanal nicht mehr funktionsfähig sind. In diesem Fall müssen die Bordnetzkomponenten neu dimensioniert werden. Bei der Spannungsstabilitätssimulation wird die Regeldynamik vom DC/DC Wandler berücksichtigt.

Fehlersimulation

Bei der Fehlersimulation werden plötzlich auftretende Komponentenfehler in der Simulation injiziert. Danach wird überprüft, ob das gesamte Energieversorgungssystem noch genügend Energie- und Leistungsvorrat hat, um das autonom fahrende Fahrzeug in einen sicheren Zustand (Safe Stop Levels) zu bringen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit der einzelnen Komponentenfehler wird mithilfe der Fehlerbaumanalysen analysiert. Bauteilfehler, die zu Komponentenfehler führen, werden entsprechend der Siemens Norm SN 29500 bedatet. Die durchgeführten Fehlersimulationen dienen dem Nachweis der Erfüllung der Sicherheitsanforderungen an das elektrische Bordnetz entsprechend der Norm ISO 26262:2011 .

5. Betriebsstrategie

Die Aufgabe einer Betriebsstrategie für ein komplexes System liegt darin, die Betriebspunkte zur Erfüllung der Systemziele möglichst sinnvoll auszuwählen und das System zu steuern .

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Aus der Sicht der funktionalen Sicherheit nach ISO26262:2011 ergeben sich zwei funktionale Sicherheitsanforderungen an das energetische Bordnetz für autonom fahrende Fahrzeuge. Zum einen muss sichergestellt werden, dass die Versorgungsspannung innerhalb der spezifizierten Grenzen für die sicherheitskritischen Komponenten bereitgestellt wird. Zum anderen muss die Höhe der vorhandenen Energieressourcen im Bordnetz mindestens zur Deckung der Energieanforderungen der sicherheitskritischen Verbraucher für die Dauer des Übergangs in den sicheren Zustand (Safe Stop Levels) ausreichen. Diese Anforderungen gelten sowohl für den Normal- als auch für den Fehlerfall. Die Betriebsstrategie für ein fail-operational Bordnetz hat demnach die Aufgabe, die Bordnetzkomponenten so zu steuern, dass die oben genannten Anforderungen auch beim Auftreten von einem Fehler (einzelfehlertolerant) erfüllt werden.

Zur Implementierung der Betriebsstrategie werden im ersten Schritt alle Fehler identifiziert, die zur Verletzung der Sicherheitsanforderungen an das Bordnetz führen können. Anschließend werden die Fehler zur Reduktion der Komplexität zu Fehlerklassen zusammengefasst. Die Auswirkung jeder Fehlerklasse auf die Energieversorgung der sicherheitskritischen Komponenten muss analysiert und Fehlerreaktionen definiert werden. Die Fehlerreaktionen umfassen Maßnahmen zur Fehlerkapselung, zur Degradierung und/oder Abschaltung der Verbraucher im Bordnetz sowie die Definition des Szenarios zum Übergang in den sicheren Zustand beim Auftreten dieser Fehlerklasse. Auf diese Weise entsteht ein Sicherheitskonzept zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen im Sinne der ISO26262:2011 , welches in der Betriebsstrategie implementiert wird und zur Steuerung vom fail-operational Bordnetz für autonom fahrende Fahrzeuge eingesetzt wird. Darüber hinaus muss die Betriebsstrategie den Energiefluss im Bordnetz so steuern, dass die zulässigen Komponentengrenzen, wie beispielsweise der Ladezustand der Batterien, nicht verletzt werden.

6. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt einen Weg zur Entwicklung eines fail-operational Bordnetzes für autonomes Fahren. Die relevanten Gesetze und Normen für autonomes Fahren und für Schlüsselkomponenten wurden analysiert und zusammengestellt. Entsprechend den aus den Gesetzen und Normen abgeleiteten Anforderungen sowie unterschiedlichen Kundennachfragen wurde eine neue fehlertolerante Bordnetztopologie für autonomes Fahren entwickelt. Diese Topologie erfüllt zum einen die gesetzlichen Anforderungen und ist zum anderen kompatibel mit dem in heutigen Fahrzeugen eingesetzten Bordnetz (Add-On-Lösung). Durch die Simulation (Ladebilanz, Spannungsstabilität, Fehlerinjektion) lässt sich eine optimale Di-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

mensionierung und Auswahl der Bordnetzkomponenten ableiten. Darüber hinaus wurde ein Sicherheitskonzept zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen an das energetische Bordnetz entwickelt und in entsprechender Betriebsstrategie implementiert. Die eingesetzte Bordnetztopologie und die Dimensionierung der Bordnetzkomponenten im Zusammenspiel mit der Betriebsstrategie erlauben nicht nur ein sicheres Anhalten des autonom fahrenden Fahrzeugs im Fehlerfall auf eigener Spur, sondern ermöglichen auch eine Weiterfahrt mit dem vom Kunden angeforderten Safe Stop Level.

Literatur:

[1] Regelung Nr. 13-H der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Personenkraftwagen hinsichtlich der Bremsen [2015/2364], EU, 2015.

[2] Regelung Nr. 79 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage, EU, 2008.

[3] H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Handbuch Fahrerassistenzsysteme Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.

[4] O. Druhm, „Bordnetz der Zukunft und dessen Absicherung," *Elektronik automotive,* pp. 30-32, 2014.

[5] P. Grabs und U. Hornfeck, „Power Distribution and Functional Safety in the Context of Highly Automated Driving," Forum Bordnetze von Bayern Innovativ, 2015.

[6] A. Kilic und W. Müller, „Fehlertolerante Bordnetze für autonomes Fahren," in *4. Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil*, Ludwigsburg, 2016.

[7] Synopsys Inc., „Saber," 04 05 2017. [Online]. Available: https://www.synopsys.com/verification/virtual-prototyping/saber.html.

[8] T. P. Kohler, Prädiktives Leistungsmanagement in Fahrzeugbordnetzen, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.

[9] Siemens AG, „SN 29500 - Ausfallraten Bauelemente," CT SR Corporate Standardization & Regulation, München / Erlangen.

[10] ISO, „ISO 26262: Road vehicles - Functional safety," ISO, 2011.

[11] M. Roth, „Betriebsstrategie," in *Energiemanagement im Kraftfahrzeug - Optimierung von CO2-Emissionen und verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2014.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Developing Adaptive Lighting in an Agile Software Factory

Dr.-Ing. **Johannes Richenhagen**, Dipl.-Ing. **Jochen Pinnekamp**,
Vijay Kumar Konenki, FEV Europe GmbH, Aachen;
M.Sc. **Max Schumacher,** Ford Werke GmbH, Köln

Kurzfassung

Die Etablierung und Erweiterung von Fahrerassistenzsystemen ist ein automobiler Megatrend. Insbesondere die Softwareentwicklung ist davon durch Komplexitätsexplosion sowie anspruchsvollere Qualitäts-, und speziell Sicherheitsanforderungen betroffen. Gleichzeitig müssen diese Anforderungen by minimalem Kosten- und Zeitbedarf erfüllt werden. Um diesen Zielkonflikt aufzulösen, werden neue Entwicklungsansätze benötigt.

Der dargestellte Lösungsansatz besteht in der Kombination zweier Disziplinen: produktionsorientierte Methoden basieren auf detaillierter Prozessdefinition, einem hohen Automatisierungsgrad und optimierter Arbeitsaufteilung. Agile Methoden fokussieren die kontinuierliche Adaption an Kundenanforderungen, schnelle Änderungen und die Planung in kurzen Entwicklungszyklen mit geringem Anforderungshub. Beide Ansätze werden zu einer „Agilen Softwarefabrik“ kombiniert.

Diese Methodik für die Entwicklung adaptiven Lichts für Ford-Fahrzeuge der nächsten Generation erläutert. Im Fokus steht die schnelle Umsetzung von Spezifikation in Software hoher Qualität. Durch diesen Ansatz müssen trotz steigender Komplexität Zeit- und Budgetrahmen nicht erweitert werden während die Qualität sogar gesteigert wird.

Abstract

The establishment and extension of advanced driving assistance systems (ADAS) is one of the automotive megatrends. This impacts automotive software development heavily: complexity and extend increase and quality and especially safety requirements will be more demanding. Additionally, customers demand suitable quality at minimum costs and time. In order to resolve this conflict of interests, new development approaches need to be found.

This paper shows an approach how advantages of two disciplines can be combined to resolve this conflict: Factory-oriented methods bring-in detailed process definition, high degree of automation and strong division of labor. Agile development methods include

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

continuous adaption to customer needs, quick changes and short cycle-planning. As a result, we develop software in an “Agile Software Factory”.
For the development of adaptive lighting functions for future Ford vehicles, we outline how specification could be quickly and flexibly transformed into high quality software. As a result, development time and costs are not affected while SW quality is even increased.

1. Introduction

With the invention of automobile and its continuous development over the past several years, automobile lighting technology also evolved. Figure 1 shows the development of automotive lighting technology over the last 60 years. In former days we had halogen headlamp which had low software complexity. With the introduction of LED lighting more software functionality was introduced. With more advanced technologies this trend will further increase which leads to increase in complexity. Especially with Mondeo and Focus vehicles the software complexity increased in the past.

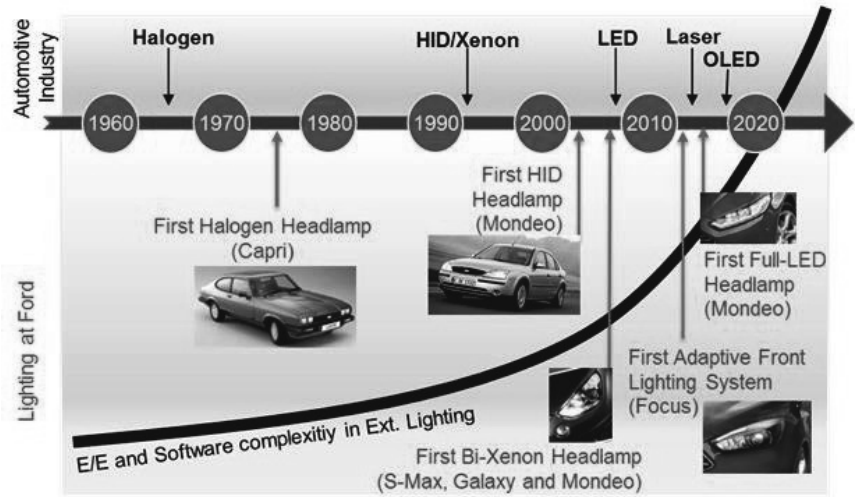


Fig. 2: Evolution of Automobile lighting

Such trends are also reflected in the cost structure [1] (see in Fig. 3). Software development influences development and hence product costs more heavily than before – even more, its influence will increase. New dominant challenges such as how to cope with quantity, variant explosion and complexity of software or how to ensure quality under market conditions, i.e.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

time & cost pressure, need to be addressed [6]. One solution approach is to handle cost and variant requirements with flexible collaboration models between Original Equipment Manufacturers (OEM), Tier-1 suppliers and services suppliers. This leads to further challenges as software exchange over all maturity levels should take place between different projects, organizations or enterprises [7]. The exchange is not possible without unified methods for the description of software quality and processes.

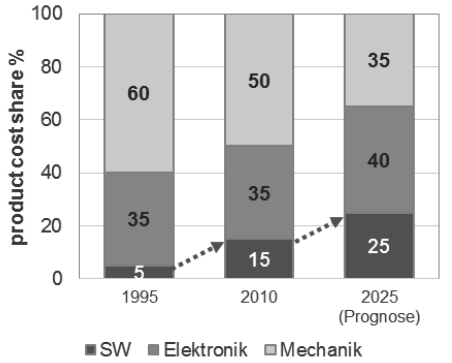


Fig. 3: Increase in Software component in automobile [1]

Today, Software is dominantly optimized in project- or company-specific environments which need to be adapted to varying requirements. This leads to a gap between available state-of-the-art model-driven development technologies on the one side and process and architecture standards as well as their efficient realization in a dynamic market with changing requirements on the other [8].

Software technical fulfillment of the described requirements by means of structured design principles are becoming more and more prominent [2, 3]. Efficient handling of the resulting cost of quality assurance is a key issue. New methods are necessary to develop standard-compliant software with high quality with a suitable development effort.

2. Agile Software Factory

Automotive Software development is dominated by factory-oriented measures to deal with development challenges. In other sectors such as telecommunications and consumer electronics, same challenges are addressed with a different mindset based on agile software development. New methods are required to get the better of the two methodologies. We will discuss some specific criteria by which we can differentiate the two sectors (see in Fig. 4).

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In software sector agile methods are used due to their simplicity and be able to easily adapt for any type of project. One of the main advantages would be that in agile methods, it has short release cycles with shorter work phases or loops. Each loop contains mainly four steps namely plan, realize, check, adjust. First the tasks are planned and then they are realized. After realization the tasks are checked and if errors are found they are adjusted with improvements. And then plan again which forms a loop. Where as in automotive the critical aspects would be planning and commitment to SOP (Start of Production) milestones, which is difficult and quality processes (e.g. ISO26262) are quite dominant which is mainly non-agile (e.g. Interaction over processes).

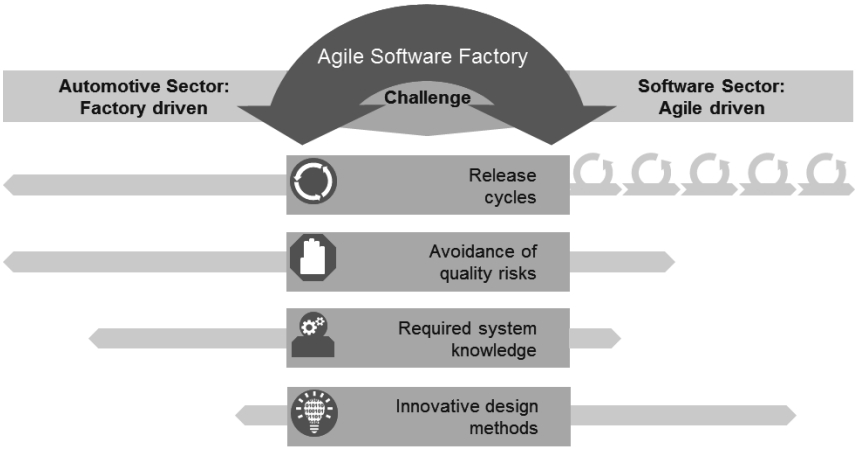


Fig. 4: Challenges in software development

The automotive sector is characterized by a long design life cycle with multiple collaborations between manufacturers and suppliers with adherence to specific quality and safety standards. E.g., in automotive lighting, prolonged design and testing phases are required since virtualization of use cases has not proceed far enough to reduce vehicle testing drastically with various scenarios.

One of the major differences between the two sectors would be the number of safety related functionality and adherences to certain safety and quality standards. In automotive sector also for non-safety functions, quality requirements (e.g. Induced by process standards such as CMMI or (A)SPICE) need to be considered. In software sector the avoidance of quality

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

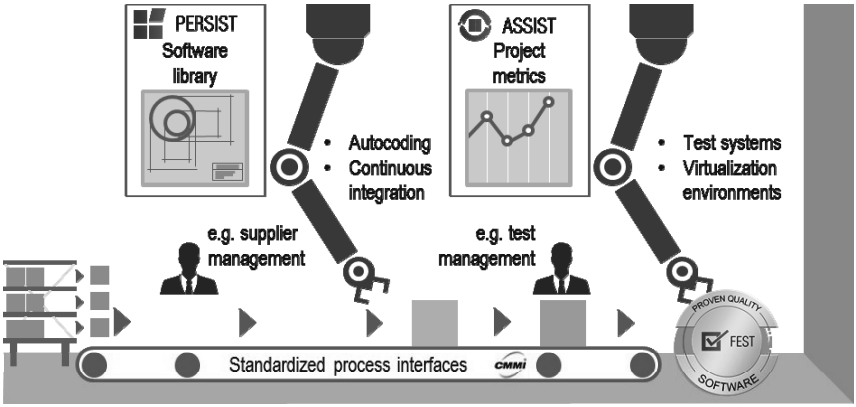
risks would be minimal compared to automotive sector as an easy update can be provided to the end customer without any life threats.

System knowledge plays a key role at different phases of automotive software development. From requirements definition (e.g. powertrain control algorithms) to software realization (i.e. coding, integration) and validation. Also involves totally different disciplines, mechanical engineering meets embedded software design; this interface is a major challenge. In software sector, qualification and background of the employees is similar.

The scope for innovation for newer design methods in automotive is very less compared to the software sector as automotive involves very safety critical systems and to adapt the new innovations they have to be completely validated. The complete validation of the new innovations takes time to market for the end product and increases the development costs. Where as in software sector it is the vice versa as the safety critical systems are very few and new innovations can be easily validated (for example new processes and new programming languages are easily introduced).

There are multiple benefits by combining the advantages of both Agile driven software sector and Factory driven automotive sector methodologies. This includes flexibility due to short release cycles, cost reduction due to high degree of automation, timeliness due to quick response to system change, risk reduction and quality with few or no quality defects.

To realize these benefits, we apply the so called “Agile Software Factory”, combining the best of both the “Factory driven” automotive sector and the “Agile driven” Software sector (see Figure 5).



https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

During the planning of an automotive assembly line, all process steps are clearly defined, but individual steps may be different or skipped entirely, depending on the variant of the vehicle. The production starts with standardized raw materials, which are assembled to form a component, which are then assembled into bigger components and finally the vehicle. Some components are standardized across vehicles and delivered to the plant already assembled by the supplier or a different assembly plant. The assembly of components is highly automated and performed by robots wherever possible. There are several quality checks, which are monitored in form of a KPI (Key Performance Indicator). If a check is passed, the component is transported to the next process step, e.g. by conveyer belts.

Analogous, the software factory starts with standardized raw materials in form of a block library. These are combined into function models, which are designed to be reused across projects. Then the function models are integrated into a system model, out of which code is generated. Throughout the process, the quality is tested and if the quality goals are met, a delivery package is generated for customer release.

In project practice, this procedure is clearly defined as a Software Development process based on the V-Model process. It allows tailoring to specific project needs, based on customer demands, e.g. by using specific tools or skipping steps outside the project scope. This is possible, because the interfaces of the process steps are clearly defined and generic. The process is supported by a toolchain “ASSIST”, which I covers all tools for the entire development process and defines the interfaces between tools. The toolchain contains third-party tools and customizations thereof as well as entirely specific tools. It aims to automate as many process steps as possible thereby reducing the effort for the developers, reducing errors and improving efficiency. Part of the toolchain is the Function Development Library, which includes basic blocks as well as more complex functionalities. It is thoroughly tested and centrally maintained to ensure good quality.

The reuse of existing functionality is handled through a model database. The database can handle different types of models and its versions and variants. This is the basis for the PERSIST Software Framework [[4, [5]. To enable reuse across projects, the models have a consistent “look-and-feel” as well as a defined maturity and interfaces. The consistency is ensured through automatic generation of model frames by the toolchain. These model frames are the starting point for the modeling. They already contain the ports defined in the interface and default settings, to reduce the effort required by the developer.

To ensure a defined maturity, formal reviews in the form of automatic guideline executed. These guidelines contain several standardized guidelines (e.g. MAAB), as well as specific guidelines that are derived from lessons learned from previous projects to avoid common

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

mistakes. The checksets are selected based on the desired maturity level. For functional verification unit test are executed on the individual models. These checks and tests are run regularly (e.g. nightly), by the CI (continuous integration) framework (see Fig. 6).
The extent of the operations performed as part of the CI depend on the project needs (see Table 1). In a previous transmission project, a high grade of automation was achieved, allowing severe effort savings. Additionally to the quality checks mentioned above, the CI can also generate other artifacts, such as software documentation and code for the project.

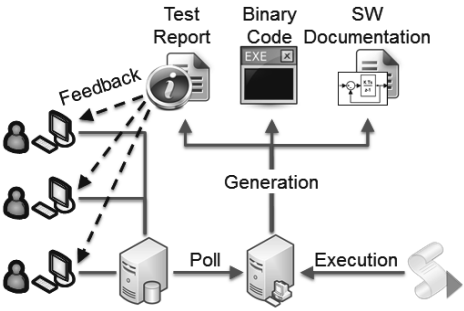


Fig. 6: Continuous Integration

Due to the work split in this project (see chapter 3. Application), the architecture and integration were not part of the FEV scope, which contained quality improvements and conversion to fixed-point. Therefore related operations were not performed. Instead focus was on guideline compliance and back-to-back testing of the implemented models against the specification models using real world measurement data.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Table 1: Continuous Integration Data

Operation	Transmission Project, 2014	This project
Data update	132	23
Model guideline checks	59	53
Model unit tests	1126	883
Model integration tests	6	not applied
Model architecture checks	10	not applied
Model documentation	2766	not applied
SW code generation	2.5 Mio. LOC	not applied
SW compilation	~2 MB Hex code	not applied
SW deployment package	30 MB	not applied
Build report	Excel log file	Excel log file

3. Application

Ford and FEV have applied the approach of the Agile Software Factory in an exterior lighting project where two innovative exterior light features will be introduced to the market in the near future.

Fig. 7 displays the two features. The first feature, in the upper right of the figure, activates a wide beam shape in round about and intersection situations based on signs detected by the camera. The second feature predicts the vehicles path by using the lane detection of the camera and swivels the light into the predicted path of the vehicle.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

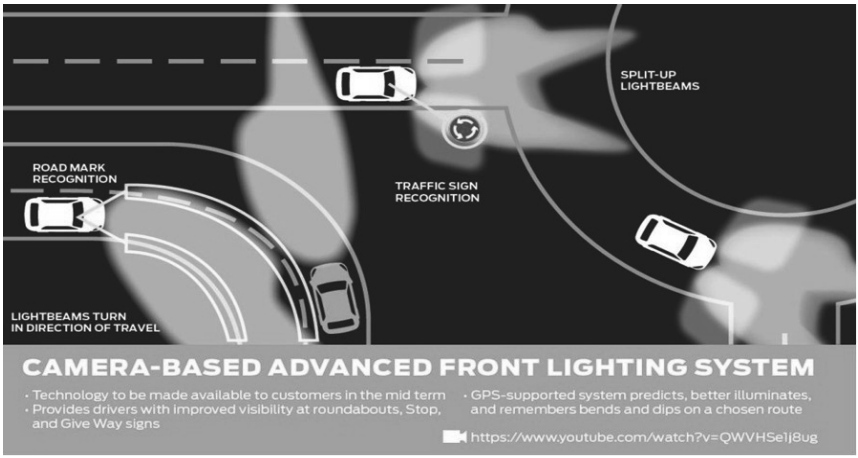


Fig. 7: Ford Camera based Advanced Front Lighting System

Several aspects during the development project of these two features caused the necessity to introduce new methods, tools and partners within the Exterior Lighting department. One aspect was that functional light control algorithm requirements could not be translated in the given time frame into written software requirements as it is the traditional way of specification handling. Hence, model-based specifications where applied: algorithm models were developed in online and offline prototyping environments to ensure proper functionality.

Additionally, the requirements could not be frozen early enough to perform a non-iterative sequential implementation. That is why Continuous Integration was applied as an agile development method to perform collateral model checks and code generation, reducing the amount of manual software creation and testing to a minimum.

In the following sections, the application of this approach for a successful delivery of the predictive swiveling feature project in the planned time is outlined as one example.

Fig. 8 provides a schematic overview of the software function as well as a high level overview of the components that contribute to these two new light features. Further it indicates the software models that were part of this development. These functions are located within the Headlamp Control Module and contain the logic of the predictive swiveling feature. FEV supported Ford with the concept of the Agile Software Factory which provided the tools and the cooperation model to successfully deliver towards a Ford milestone within an automotive vehicle development project.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

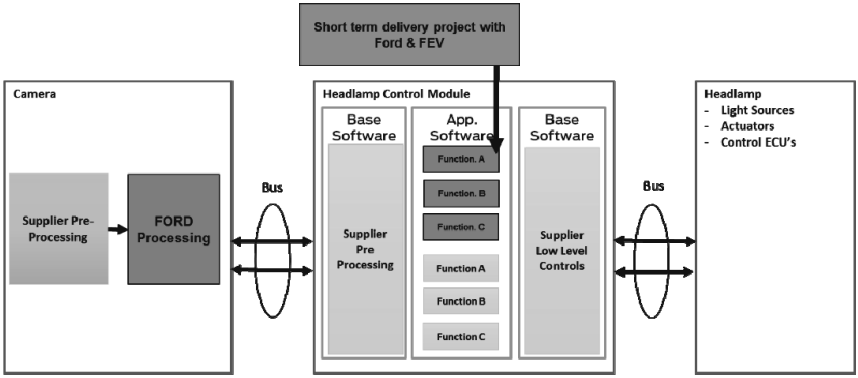


Fig. 8: System block overview diagram of the first implementation

The Agile Software Factory methodology was included into the project workflow and participated in creating software models out of functional models as shown in Figure 9. This workflow foresees different software development steps to allow each stakeholder to concentrate on their main responsibility. The initial step was the creation of functional models by the Ford Research department, which used floating point calculation, to express the functionality that shall be implemented. In the second step these functional models were translated to implementation models, which were designed to be code to a fix point microcontroller, by the Ford product development department and FEV.

The shown workflow is the result of several adjustments of the workflow. These adjustment were necessary due to the complexity of the project. One adjustment that provided large improvement to the project were clear agreements on the deliveries and guidelines with automated quality checks. This allowed handovers between each step in the workflow, for example from the functional to the software development. Every stakeholder was able to concentrate on his portion of the development. The adjustments as such were mainly caused by the multiple interfaces and the introduction of new methods to the development team within a short term delivery project. Further, the scope of the development project and methods used changed during the (pre-) development, which resulted in the fact that multiple parties had to join forces to meet the milestone by efficiently working together.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

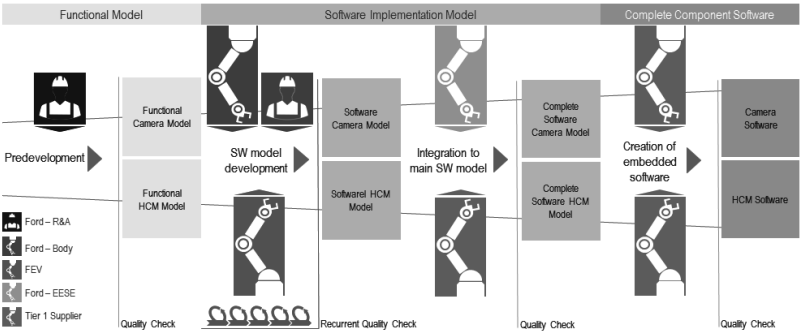


Fig. 9: Detailed workflow of the applied agile software factory

Fig. 10 shows the effect of this setup on the project progression and work loops done in the given cooperation. A loop means in this context a cycle were the Ford and FEV team worked in parallel for an agreed amount of time with defined deliverables. This enabled the Ford team to enhance the functionality of the model, while the FEV team started to translate completed model units into an implementation model.

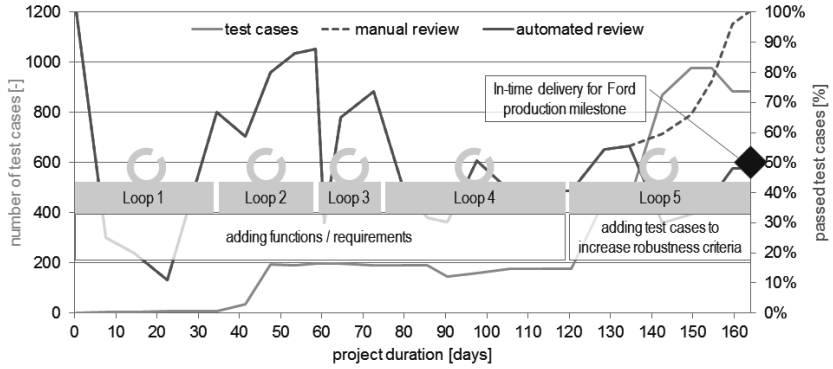


Fig. 10: Project progression and work loops

The combination of agile methods and fixed automotive quality measures accelerated the project progress drastically, even though that the time frame was very short.

In principle there were four loops focusing on adding requirements and functionality to the implementation model and another loop to increase the robustness of the implementation model. Every development loop was supported by an automatic test case tool which

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

executed and automatically reviewed the results of the software model. The first four loops were supported only by automated reviews. This allowed the engineers at FEV to focus on increasing the quality of the software model and the Ford engineers to create more test cases and to add more functionality into the functional models. With loop 1 the engineers concentrated mainly on translating the principle functionality from the functional model to the software model without large attention on the accuracy, which is the rational for decreased amount of automated passed test cases in this loop.

In the second loop 2 most of the functionality was translated, which allowed the software engineers to focus on the quality and accuracy of the software model (indicated by an increasing amount of test cased over time). The focus of loop 3 was again to add more functional of the functional source model, which explains the decrease of the passed automated test cases. With the fourth loop the majority of the functionality was translated, therefore the software engineers could incorporate the changes and keep the quality of the software models.

In the final loop the quality of the software model increased to full product quality by using the automated passed test and manual reviews of the joint project team (indicated by the dotted line). Further, these manual reviews allowed to walk through the results of the automated testing in a crossfunktional team to increase correctness of the final software. Manual review means in this context that the Ford and FEV team reviewed the result of the test cases together and decided case by case how to handle failed test cases. Since a large amount of tests was already automatically checked, Function Owners could focus on a smaller amount of text cases to be handled manually while the number of performed tests even increased. Quality was improved with less effort. This efficient collaboration lead to a successful delivery of a Ford milestone which participated into the overall delivery of the development project.

4. Summary and Outlook

This paper has shown, how software complexity explosion at challenging time and budget conditions can be handled with the concept of an agile software factory. The strengths of factory-oriented and agility-oriented approaches were combined for the development of adaptive lighting functions in future Ford vehicles. From the factory side, a development process was defined which is based on quality gates between project phases and a model-based specification strategy. From the agility side, the method Continuous Integration was applied for quality monitoring while interdisciplinary teams of algorithm and software specialists decided in defined loops the scope of work for that loop and provided the intended solution. As a result, quality requirements could be fulfilled at given project conditions.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

In the future, there will be further steps for both the application as well as the Agile Software Factory:

Fig. 11 oultlines the application outlook as in terms of software complexity progression in the exterior lighting system in future. With the increasing availability of sensor technologies in a car in future and the progression of innovative exterior light technologies the necessity of a mindset similar to the Agile Software Factory will be required.

Especially the increase of possible new sensor interfaces to the lighting system will require in future a clear metric driven software development process. This needs to incooperate though the agile mindset to allow drastic requirement changes throughout a development project.

From the process side, there is a large potential to extend the method to other parts of the workflow which so far were not optimized due to the selected work split – e.g. also Tier 1 suppliers could be integrated to tap the efficiency potential even further.

Also, the agile software factory is not fixed. Especially the increase of more functional interfaces, as show in Fig. 11 will require re-adjustments once a new department or business partner is incoperated into the workflow. In addition, the toolchain interfaces and artifacts will be modeled, to further extend the interopability of different enterprise toolchains.

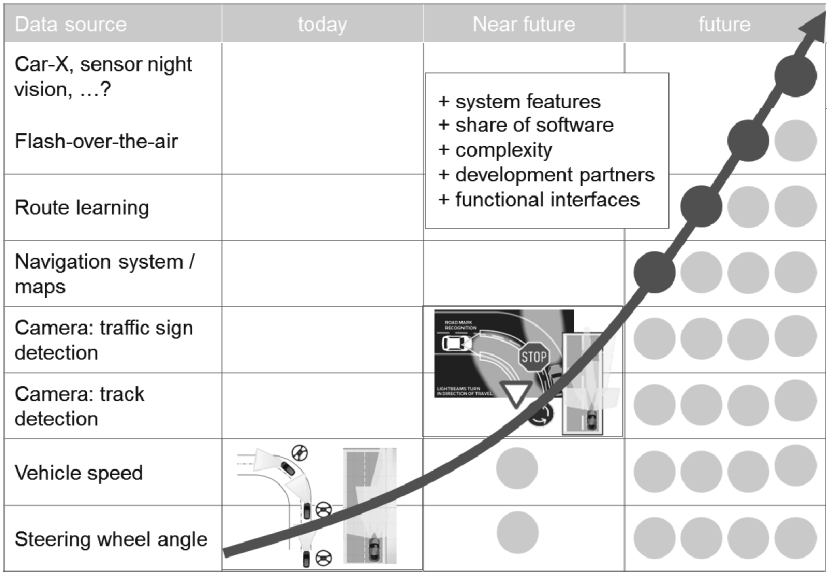


Fig. 11: Outlook for Software complexity and need for the Agile Factory Expansion in future

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literature:

[1] M. Broy, G. Reichart, and L. Rothhardt, “Architekturen softwarebasierter Funktionen im Fahrzeug: von den Anforderungen zur Umsetzung”, Informatik-Spektrum, vol. 34, no. 1, pp. 42–59, 2011.

[2] Jürgen Mössinger, “Software in Automotive Systems,” IEEE Software, vol. 27, no. 2, pp. 92–94, 2010.

[3] S. Fürst, “Challenges in the Design of Automotive Software,” in Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test, 2010, pp. 256–258.

[4] Richenhagen, Johannes, Stefan Pischinger, and Axel Schloßer. "PERSIST-A flexible and Automatically Verifiable Software Architecture for the Automotive Powertrain." *Journal of Electrical Engineering* 2.25, pp. 108-115, 2014.

[5] Richenhagen, Johannes, et al. "PERSIST–A scalable software architecture for the control of diverse automotive hybrid topologies." 15. Internationales Stuttgarter Symposium. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.

[6] Dr. Axel Schloßer, Jürgen Schnitzler, Thomas Sentis, Dr. Johannes Richenhagen “Agile processes in automotive industry – Efficiency and quality in software development” 16. Internationales Stuttgarter Symposium 2016

[7] A. Nguyen-Duc et al., “The impact of global dispersion on coordination, team performance and software quality – A systematic literature review “, Inform. Softw. Technol. (2014)

[8] S Andrè, R Stolt, F Elgh, J Johansson, M Poorkiany, ”Managing Fluctuating Requirements by Platforms Defined in the Interface Between Technology and Product Development” The 21st ISPE International Conference on Concurrent Engineering, 8-11 September 2014, Beijing, China

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

New methods for control algorithm design

Dr. **Markus Behle**, Dipl.-Ing. Dipl.-Inform. **Arndt-Michael Meyer**,
ETAS GmbH, Stuttgart

Nowadays, one of the challenges in control design is, that there is no common understanding between control engineers and software developers. One approach to overcome this gap is, to use block diagrams as a “common language” between control and software engineers. All know that this is a bad compromise for both parties. Control engineers are forced to deal with details they are not interested in (hierarchies, references, etc.) and on the other hand, models are not detailed enough for software engineers to e.g. generate high quality code. Robert Bosch corporate research analyzed this situation by closely following many controls code development projects. The main reason of the problem turned out to be the fact that control flow and data flow was often completely mixed. The results of the analysis were used to develop two new methods facilitated by new tools for the development of control algorithms.

During the first step an essential analysis will be performed using the so called SCODE method (**S**ystem **CO**-**DE**sign). Supported by the SCODE tool the engineers are able to capture the discrete logic behavior of the system. As a result of the essential analysis, the complexity of the system will be significantly reduced. The benefit will depend on the characteristics of the system. In one specific project at Robert Bosch the application of the SCODE method reduced number of paths through the system by over 99%. (comp. “Mastering the Complexity of Engine Control Functions” by Zimmermann, Bleile, Heiber, Henle in *MTZ world* Issue No. 2015-01). After applying the SCODE essential analysis, the system was “reduced” to relevant, logic-free system modes which contain only continuous behavior.

This continuous behavior is the domain of control engineers and therefore a second method / tool combination called Constraint Graph (CONGRA) was developed. The basic idea is to represent mathematical equations in a bi-partite graph of boxes (=equations) and circles (=variables). Boxes and circles are connected via edges which show which variables are used in which relations.

Unlike block diagrams, the graph does not say anything about the calculation direction, thus these initial graphs are undirected. Once the input variables are selected, the graph becomes a directed graph – also called a flow.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

As the undirected graph describes the underlying equation system (usually the physics) it is possible to derive multiple flows from the undirected graph. In the example in Figure 1 Newton's law (left hand graph) is always true while in the 3 derived flows the inputs vary. Blue bullets are inputs, while green bullets are outputs.

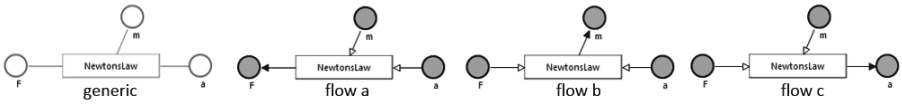


Fig. 1: Derived flows from generic graph

The bi-partite graph offers a visualization of the underlying equation system – for the given example (Newton's law) this is trivial and does not seem to be of too much use, but when applied to larger equation systems the benefits quickly become obvious. In systems of ten or more equations it becomes very hard to get an overview how the different forces (variables) interact with each other.

Additionally it is possible to perform a set of analyses on the flows. Below we give a short list of the main characteristics of such a system defined by equations.

- "Under-constraint" - If there should be not enough input variables to solve all equations, the graph will highlight the area(s) where information is missing to control the system. In this case information e.g. from sensors of subsystems is missing.
- "Over-constraint" - If there should be too many inputs, which lead to a conflict as a variable could be calculated through different paths, the conflicting areas are being highlighted. This can have two advantages. First there is a possibility to reduce the number of sensors. Second this extra information can be used to derive diagnosis function.
- "Algebraic loops" - Those parts have to be solved together and cannot be put into a sequential order (e.g. a set of 2 coupled equations with 2 unknown variables). With the help of the underlying CAS (computer algebra system) these algebraic loops don't need to be torn apart but can be solved analytically. Thus the dynamics of the system can be preserved.
- "Sensitivity analysis" - The derivatives of all equations after all variables show in the graph, how "sensitive" all other variables react on the change of a selected variable or parameter– throughout the whole system.

These analyses a control engineer usually has to do by hand, or with the help of tools, which cannot easily be integrated in the overall development tool chain. With Constraint Graph

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

(CONGRA) control engineers have the possibility to answer basic questions like *“Do I have enough variables to solve my equations?”, "How do the different elements in my system interact?”, “How can I visualize complex coupled structures?*” by simply looking at the graph. In addition to this, with CONGRA it is easily possible for a control engineer to apply implicit time-dicretization methods to a set of differential equations. A software engineer then profits from that as he can integrate a much more stable implementation of a dynamic system in a slower time grid. And last but not least, both tools allow to automatically generate code which can be automatically converted into series ECU code.

The combination of SCODE and CONGRA allows a single engineer or a team of engineers to reduce the complexity of the solution to the intrinsic complexity of the physical system, visualize and simulate it and even automatically generate code suited for production ECUs.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Zeitliche Eigenschaften in komponentenbasierter Automotive-Software

M.Sc. **Tobias Sehnke**, Dr.-Ing. **Dieter Schwarzmann**,
M.Sc. **Remko Baur**, Dipl.-Ing. **Matthias Schultalbers**,
IAV Automotive Engineering, Gifhorn;
Dr.-Ing. **Rolf Ernst**, Universität Braunschweig,
Institut für Datentechnik und Kommunikationsnetze

Kurzfassung

Automotive Software von modernen Kraftfahrzeugen besteht aus seiner Vielzahl von unabhängig entwickelten Komponenten mit komplexen Datenabhängigkeiten. Um die Funktionalität des Gesamtsystems sicherzustellen, wird die Kompatibilität der einzelnen Komponenten auf Basis von Komponentenmodellen während der Integration überprüft. Bestehende Modelle fokussieren hierbei auf die syntaktische Kompatibilität der Komponenten. Sie berücksichtigen jedoch nur in geringem Maße den Kontext der kommunizierten Information, der hauptsächlich durch zeitliche Eigenschaften bestimmt wird.

In dieser Arbeit wird ein Ansatz präsentiert, um fehlerhafte Annahmen an zeitliche Signaleigenschaften zu vermeiden. Dafür wird ein Ansatz zur Beschreibung von zeitlichen Eigenschaften von Signalen vorgestellt. Anhand eines Anwendungsbeispiels wird demonstriert, wie diese Eigenschaften als Teil der Schnittstellenbeschreibung von Komponenten dokumentiert werden und wie diese Anforderungen auf Systemebene überprüft werden können.

1. Einleitung

Mit der zunehmenden Vernetzung von Fahrzeugen, neuen Mobilitätskonzepten sowie die immer restriktivere Abgasgesetzgebung für moderner Kraftfahrzeuge rückt die Bedeutung von Automotive Software zunehmend in den öffentlichen Fokus. Gleichzeitig steigen damit die Ansprüche an die Qualität und Zuverlässigkeit der Software. Um die Kosten der Software und die Komplexität der Entwicklung zu reduzieren, ist die Software in eine Menge von wiederverwendbaren Komponenten aufgeteilt, die zeitlich und räumlich verteilt entwickelt und getestet werden. Diese Komponenten sind unter anderem für die Verarbeitung von Signalen sowie die Steuerung- und Regelung und Diagnose von physikalischen Zuständen verantwortlich und verfügen über zeitabhängige Zustände. Daher müssen für ihre korrekte Funktion zeitlichen Eigenschaften, wie z.B. Totzeiten oder Abtastraten berücksichtigt werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Berücksichtigung dieser Eigenschaften ist ein komplexes Problem. Erstens hat nur eine geringe Anzahl von Komponenten einen direkten Zugang zur physikalischen Welt. Vielmehr werden die Eingangsgrößen von Komponenten durch Signalflüsse bestimmt, die mehrere Komponenten beinhalten. Zweitens wird das Zeitverhalten von vernetzten Steuerungssystemen durch komplexe Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten bestimmt. Dementsprechend kann das Zeitverhalten dieser Systeme nur global für das Gesamtsystem analysiert werden. In der Literatur werden daher zeitliche Eigenschaften, die durch funktionsübergreifende Signalflüsse bestimmt werden, global auf Basis von Event-Chains adressiert [1-4].

Eine ausschließliche Identifikation von zeitlichen Anforderungen auf globaler Ebene setzt voraus, dass es eine zentrale Instanz gibt, die Kenntnis über alle regelungstechnischen Details einer jeden Komponente des Systems hat. Aus Erfahrung können wir argumentieren, dass die Grundannahme in einem verteilten Entwicklungsprozess dazu führen wird, dass zeitliche Anforderungen mangelhaft spezifiziert und entsprechen ungetestet sind. Das Resultat können Integrationsfehler sein, die sich auf die Qualität und Performance des Gesamtsystems auswirken.

In dieser Arbeit zeigen wir ein Vorgehen auf, bei dem die Anforderungen von Komponenten an die zeitlichen Eigenschaften ihrer Eingangsdaten als Teil der Komponentenbeschreibung dokumentiert werden. Die grundsätzliche Idee unserer Methodik besteht darin, Signaleigenschaften basierend auf einer Referenz zur globalen Zeit zu beschreiben. Dieser Ansatz ermöglicht es, zeitlichen Signalanforderungen an den Schnittstellen von Komponenten ohne Bezug auf den eigentlichen Signalfluss zu beschreiben. Diese Anforderungen können anschließend als Teil der Systemintegration getestet werden. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten, die zeitliche Eigenschaften von Komponenten berücksichtigen (z.B. [10]), fokussiert diese Arbeit jedoch nicht auf Implementierungsaspekte der einzelnen Komponenten, wie die Ausführrate, die Laufzeit, die Antwortzeit bzw. dem verfügbaren Service, sondern auf die Identifikation und den Test von globalen Zeitanforderungen, welche aus funktional bedingten lokalen Anforderungen abgeleitet werden.

2. Signaleigenschaften

Die Software eines Fahrzeugs wird als eine Komposition von Komponenten c_i modelliert, die ausschließlich über Schnittstellen kommunizieren. Die Kommunikation erfolgt zwischen Software-Komponenten in Form von Schreiben und Lesen oder mit der physikalischen Welt in Form von Sampeln und Aktuieren. Der Typ der einzelnen Schnittstelle wird wie folgt gekennzeichnet: Sampling $\underline{\boldsymbol{s}}$, Lesen $\underline{\boldsymbol{u}}$, Schreiben $\underline{\boldsymbol{y}}$, sowie Aktuierung $\underline{\boldsymbol{z}}$. Weiterhin beschreibt

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

der Ausdruck $\underline{\boldsymbol{x}}$ einen Platzhalter für ein beliebiges Interface. Die Notation $\underline{x}_{(i,j)}$ adressiert die j-te Schnittstelle der Komponente c_i.

Für die Bestimmung der Signaleigenschaften wird der klassische Begriff des Events um den sogenannten logischen Zeitstempel erweitert. Diese Erweiterung basiert auf der Annahme, dass ein Event einen Zustand in der physikalischen Welt repräsentiert. Ein Event x^k beschreibt ein Ereignis an einer Schnittstelle $\underline{\boldsymbol{x}}$, dass zu einem Zeitpunkt $\hat{t}_x^k$ auftritt und dessen Wert v_x^k den physikalischen Zustand $\overline{v}(t_x^k)$ beschreibt. Formal ist ein Event definiert als Tripel $x^k = (v_x^k, \hat{t}_x^k, t_x^k)$ wobei t_x^k als logischer Zeitstempel bezeichnet wird. Der logische Zeitstempel t_x^k bildet somit eine Referenz in die globale Zeit, die den Zeitpunkt beschreibt, in der die enthaltene Information gültig ist. Ferner beschreibt der Delay d_x^k eine Veränderung des logischen Zeitstempels durch einen Algorithmus. Ein positiver Delay kann durch Buffer und Verzögerungsglieder entstehen, während ein negativer Delay durch Prädiktionen entstehen kann.

Wir bezeichnen die geordnete Menge von Events, die an einer Schnittstelle auftreten als Signal $x = (x^1, x^2, \dots)$. Jedem Signal x kann eine Menge von Signalflüssen $e_x = \{e_x^1, e_x^2, \dots\}$ zugeordnet werden, die den Informationsfluss zu der Schnittstelle $\underline{\boldsymbol{x}}$ beschreiben, wobei e_x^m eine geordnete Menge von Schnittstellen ist. Ein generisches Beispiel für einen Signalfluss zeigt Bild 1. Eine Wirkkette ist eine geordnete Menge von kausal abhängigen Events entlang eines Signalpfades. Dabei wird für jede Schnittstelle eines Signalpfades ein Event zugeordnet, so dass $P_x^{(m,k,i)} = (s^r, \dots, x^k)$. Weiterhin beschreib P_x die Menge aller Wirkkette die zu einem Event x^k zugeordnet werden können. Der Unterschied zwischen den Zeitstempeln des ersten und des letzten Events einer Wirkkette wird als Latenz bezeichnet. Für eine Wirkkette $P_x^{(m,k,i)} = (s^r, \dots, x^k)$ ist die Latenz:

$$h_x^k = \hat{t}_x^k - \hat{t}_s^r \; \forall \, (k,r) \in P_x \tag{1}$$

Ferner beschreibt die Event-Distanz die Differenz von zwei aufeinander folgenden Events in einem Signal:

$$\Delta\hat{t}_x^k = \hat{t}_x^k - \hat{t}_x^{k-1} \; \forall \, k \in 1,2,\dots \tag{2}$$

Sowohl die Latenz als auch die Event-Distanz sind in Standard-Modellen wie AUTOSAR [2], Marte [3] oder AMALTHEA [4] berücksichtigt und können durch Analyse-Methoden wie z.B.: Compositional Performance Analyse [6], Network Calculus [5] oder Automaten-basierten Methoden [7],[8] absolut, probalistisch bzw. in Form von Beschränkungen ermittelt werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

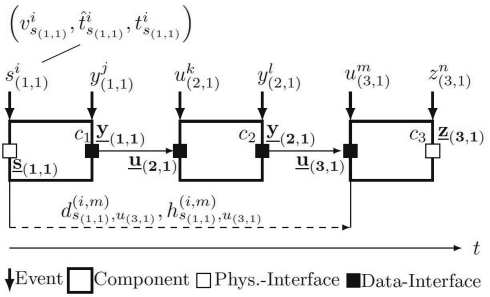


Bild 1: Generisches Beispiel für einen Signalfluss

Für eine Wirkkette $P_x^{(m,k,i)} = \left(s^r, \ldots, x^k\right)$ wird der logische Zeitstempel definiert als die Summe des Zeitstempels des Sampling-Events und der algebraischen Delays entlang des Signalpfades:

$$t_x^k = \hat{t}_s^r + d_x^k \;\; \forall \; (k,r) \in P_x \tag{3}$$

Basierend auf diesem Modell werden Signaleigenschaften formalisiert, die für die Funktionalität einzelner Komponenten relevant sein können. Zu diesen Eigenschaften gehören das logische Datenalter a_x^k, die logische Samplingrate Δt_x^k, die logische Bandbreite l_x sowie Aliasing. Diese Größen sind in der Literatur grundsätzlich bekannt, jedoch nicht in der hier vorgestellten Interpretation als Schnittstellengröße, die auf Wirkketten referenziert. Für jede Größe wird eine Definition basierend auf logischen Zeitstempeln sowie ein funktionaler Zusammenhang zu den Größen Latenz und Event-Abstand aufgezeigt. Eine formale Herleitung dieser Zusammenhänge wird in [11] beschrieben. Eine Interpretation des logischen Datenalters und der logischen Samplingrate zeigt Bild 2.

Logisches Datenalter

Das logische Datenalter a_x^k beschreibt die Differenz zwischen dem Zeitstempel des Events $\hat{t}_x^k$ und dem logischen Zeitstempel t_x^k:

$$a_x^k = \hat{t}_x^k - t_x^k \;\; \forall \, k \in 1{,}2, \ldots \tag{4}$$

Mithilfe des logischen Datenalters können unter anderem Eingangstotzeiten beschrieben werden. Das Datenalter kann auch Teil einer funktionalen Beschreibung sein, z.B. wenn eine Funktion einen Bauteildefekt innerhalb eines gegebenen Zeitraums erkennen muss. Das logische Datenalter kann aus dem Delay entlang des Pfades und der Latenz bestimmt werden:

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$a_x^k = h_x^k + d_x^k \ \forall\, k \in 1,2,\ldots \tag{5}$$

Logische Samplingrate

Die logische Samplingrate beschreibt die Differenz zwischen den logischen Zeitstempel von zwei aufeinanderfolgenden Event:

$$\Delta t_x^k = t_x^k - t_x^{k-1} \ \forall\, k \in 1,2,\ldots \tag{6}$$

Mit der logischen Samplingrate kann beschrieben werden, wie oft sich die Information an einem Interface verändert. Dies kann zum Beispiel relevant sein für eine Funktionalität, welche die numerischen Ableitung $y(k) = (x(k) - x(k-1))/\Delta t$ mit einer konstanten Zeitdifferenz Δt bildet, da die Korrektheit des Ergebnisses maßgeblich durch die Abtastrate beeinflusst wird. Unter der Annahme, dass die Delays innerhalb einer Komponente konstant sind, kann die Samplingrate aus der Event-Distanz und den Latenzen bestimmt werden:

$$\Delta t_x^k = \Delta \hat{t}_x^k - \left(h_x^k - h_x^{k-1}\right) \ \forall\, k \in 1,2,\ldots \tag{7}$$

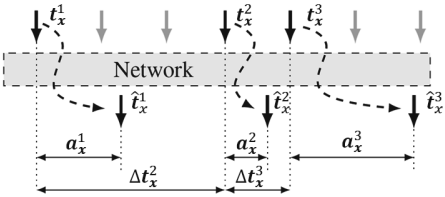


Bild 2: Abstraktion des Signalflusses von x mit einer Darstellung des logisches Datenalters a_x^k und der logischen Samplingrate Δt_x^k.

Logische Bandbreite

Die logische Bandbreite l_x beschreibt die höchste Frequenz im Spektrum eines Signals, die eine Amplitude größer als 0 hat. Formal ist die logische Bandbreite definiert als:

$$l_x = 1/2 f_x^{max} \tag{8}$$

wobei f_x^{max} die Grenzfrequenz des Signals ist. Sofern kein Spektrum für das Signal gebildet werden kann, beschreibt die logische Bandbreite den geringsten Zeitabstand in dem sich Information an einer Schnittstelle verändern kann. Die Größe kann unter anderem genutzt werden, um unnötige Mehrfachfilterungen von Signalen zu vermeiden. Die Logische Bandbreite wird durch die logische Samplingrate nach unten beschränkt. Weiterhin kann die Bandbreite durch eine Filterung, beschrieben durch g_u , innerhalb einer Komponente verän-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

dert werden. Die Logische Bandbreite ermittelt sich daher durch eine iterative Berechnung entlang des Signalpfades:

$$l_u = \max\{l_y, \Delta t_u\}, \quad l_y = \max\{g_u, \Delta t_y\} \; \forall (y,u) \in e \tag{9}$$

Aliasing

Aliasing ist ein in der Signalverarbeitung bekannter Effekt, der auftritt, wenn die Abtastfrequenz eines Signals kleiner ist als die Nyquist-Frequenz. Dabei kommt es zu einer fehlerhaften niederfrequenten Interpretation von hochfrequenten Signalanteilen. Dieser Effekt kann an den Sensoren selbst oder bei jeder Kommunikation auftreten, bei der die Lesefrequenz geringer als die Schreibfrequenz ist. Aliasing tritt auf, wenn für eine Kommunikation innerhalb des Signalpfades e_x die logische Bandbreite größer als die logische Samplingrate ist

$$l_y \geq \Delta t_u \quad \forall (y,u) \in e. \tag{10}$$

Ist Aliasing einmal aufgetreten, wird die fehlerhafte Information entlang des Signalpfades propagiert. Aliasing kann unter anderem dazu führen, dass eine Regelung ein Messrauschen als niederfrequente Störung interpretiert und das System dadurch angeregt wird.

Datensynchronität

Die Datensynchronität beschreibt die Differenz der logischen Zeitstempel von zwei gleichzeitig verarbeiteten Werten und kann für die Signale x_1, x_2 beschrieben werden durch

$$\zeta^k_{x_1,x_2} = t^k_{x_1} - t^k_{x_2} \quad \forall k \in 1,2,\ldots \tag{11}$$

Die Synchronität von Daten kann relevant sein, wenn ein Modell mehr als ein Eingangssignal verarbeitet. Ein zeitlicher Versatz dieser Daten kann dann zu Fehlern in den berechneten Werten führen. Unter der Annahme, dass die Werte simultan gelesen werden, kann die Datensynchronität aus der Differenz der Signalalter bestimmt werden.

3. Methodik

Wie bereits beschrieben, ist es Ziel dieser Arbeit die Anzahl von Integrationsfehlern zu reduzieren, die durch fehlerhafte Annahmen an zeitliche Signaleigenschaften entstehen. Auf Basis der zuvor beschriebenen Signaleigenschaften wird in diesem Abschnitt eine Methodik vorgestellt, bei der Annahmen an zeitliche Anforderung auf Ebene der Komponente lokal dokumentiert und diese Annahmen während des Integrationsprozesses verifiziert werden. Die Überprüfung erfolgt zur Design-Time.

Die Methodik besteht aus drei elementaren Prozessschritten. Zunächst wird das Verhalten der einzelnen Komponenten sowie Anforderungen der Komponente an Signaleigenschaften bestimmt und dokumentiert. Während des Integrationsprozesses werden zunächst die Sig-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

nalflüsse der spezifizierten Schnittstellen bestimmt. Anschließend werden die Wirkketten für diese Signalflüsse mithilfe einer Echtzeit-Analyse ermittelt und die Latenz und Event-Distanzen bestimmt. Ein Überblick über diese Methodik zeigt Bild 3.

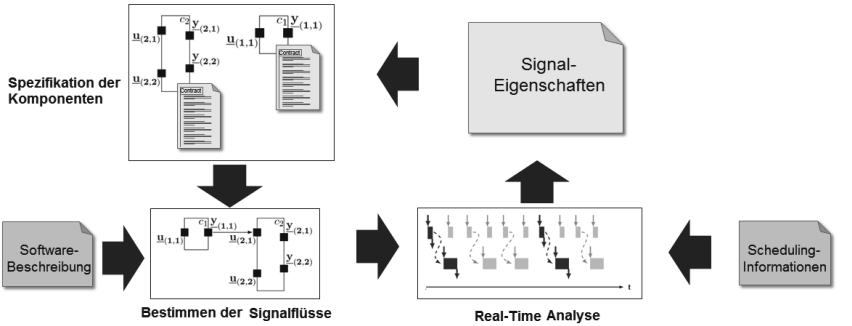


Bild 3: Prozess zur Spezifikation und Analyse von Signaleigenschaften

Spezifikation der Komponente

Für die einzelnen Komponenten wird sowohl die Anforderungen an Signaleigenschaften der Eingangssignale sowie die Eigenschaften der Ausgangssignale in Relation zu den Eingängen dokumentiert. Anforderungen können grundsätzlich für jede der beschriebenen Signaleigenschaften gestellt werden. Solche Anforderungen können unter anderem aus Expertenwissen, Simulationsergebnissen oder formalen Analysen generiert werden. Die Eigenschaften der Ausgangssignale werden durch die Eingänge vererbt, können aber durch die Verschiebung des Zeitstempels (Delay) sowie einer Veränderung der logischen Bandbreite (Resampling) innerhalb einer Komponente verändert werden. Eine Visualisierung einer solchen Beschreibung für eine generische Komponente zeigt Bild 4.

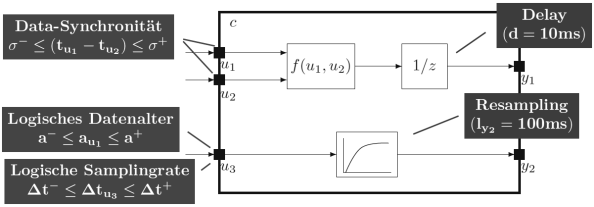


Bild 4: Beispiel für eine Komponente mit Komponentenbeschreibung mit Anforderungen an Signaleigenschaften (rot) und den Veränderungen von Signaleigenschaften (blau).

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Bestimmung der Signalflüsse

Wie bereits beschrieben referenzieren die Signaleigenschaften auf kausale Wirkketten und deren Eigenschaften, welche während der Integration bestimmt werden müssen. Für diese Analyse werden zunächst die Signalflüsse automatisiert basierend auf der Software- und der Komponentenbeschreibungen bestimmt. Die Identifikation der Signalflüsse setzt voraus, dass das Verhalten der einzelnen Komponenten beschrieben ist und dass eine Softwarebeschreibung des Gesamtsystems vorliegt. Die Bestimmung der Signalflüsse erfolgt basierend auf einem gerichteten Signalflussgraph. Für die Konstruktion des Graphen werden zunächst alle Schnittstellen als Knoten festgelegt. Für jede Kommunikation zwischen zwei Schnittstellen kann eine Kante eingefügt werden. Für die Beschreibung der Abhängigkeiten innerhalb einer Komponente werden die Komponentenbeschreibungen ausgelesen. Für jede Verknüpfung zu einem Input wird im Signalflussgraph eine Kante hinzugefügt. Die Signalflüsse eines Signals sind alle nichtzyklischen Pfade in diesem Graph, die an der Schnittstelle enden. Diese Suche dieser Pfade erfolgt durch Standard-Algorithmen.

Analyse des Echtzeitverhaltens

Die Ermittlung der individuellen Wirkketten und ihrer Eigenschaften erfolgt mithilfe von bestehender Real-Time Analyse-Methodik. Real-Time Analysen berechnen bzw. beschränken die Zeit zwischen der Aktivierung von Tasks basierend auf bekannten Aktivierungsmustern und Ausführungszeiten dieser Tasks sowie Informationen über das Scheduling des Systems. Für periodische Systeme mit Registerkommunikation kann die Latenz einer Wirkkette z.B. mit der in [14] vorgeschlagene Methode bestimmt werden. In vernetzten Echtzeitsystemen können zusätzlich Effekte wie sporadisch auftretende Events, Jitter sowie Event-Propagierungen auftreten. Für die Analyse solch komplexer Systeme können die in [5-7] beschriebenen Methoden und ihren Erweiterungen verwendet werden.

4. Anwendungsbeispiel

In diesem Abschnitt wird die Methodik anhand eines einfachen Anwendungsbeispiels demonstriert. Dafür wird auf eine Komponente fokussiert, die einen Zustand im Kraftstoffsystem eines Otto-Motors schätzt. Das Hochdrucksystem eines Otto-Motors besteht aus einer Hochdruckpumpe, die Kraftstoff in das Common Rail fördert, welches als Vorhalt für die Einspritzventile dient. Die untersuchte Komponente schätzt das Kompressionsmodul des Kraftstoffs im Common-Rail. Dieser Parameter wird in der Steuersoftware unter anderem für die Berechnung der Einspritzzeit verwendet. Die Komponente berechnet zunächst die Massenströme des Common Rails basierend auf Drehzahl, der Kolbenposition, der Einspritzzeit- und

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Dauer, dem Förderende der Kraftstoffpumpe sowie dem gemessenen Druck des Common-Rails und berechnet daraus mithilfe eines modellbasierten Filters den gesuchten Parameter. Eine Übersicht über die Komponente zeigt Bild 5. Für eine vollständige Beschreibung der Komponente wurde in [12] präsentiert. Wie in Bild 5 dargestellt, werden die Eingangsgrößen der Komponenten von anderen Komponenten vorverarbeitet und hängen somit von komplexen Signalflüssen ab. Für die folgende Dokumentation der Komponentenbeschreibung, die Bestimmung der Signalpfade sowie die Berechnung der Signaleigenschaften wird ein in Python entwickeltes Werkzeug verwendet. Die Darstellung und Analyse des Signalflussgraphen erfolgt mithilfe der Toolbox Networkx [13].

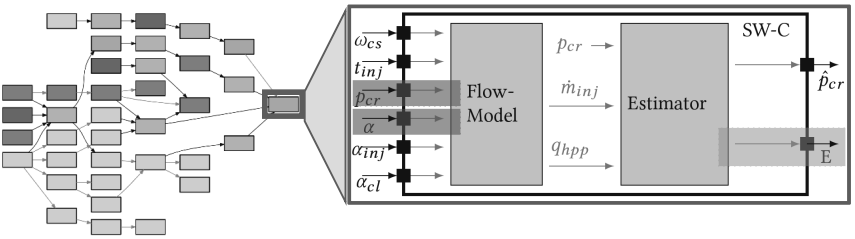


Bild 5: Komponentenübersicht über Beispielkomponente sowie Ausschnitt aus der funktionalen Struktur der Steuerungs-Software

Eigenschaften der Ausgangssignale

Die Funktion schätzt den Druck und das Kompressionsmodul durch eine modellbasierte Filterung. Der Algorithmus selbst führt weder zu einer Verzögerung von Signalen noch findet eine Begrenzung der Bandbreite statt. Der Kontext des Kompressionsmoduls sowie den geschätzten Druck wird daher direkt vom gemessenen Druck vererbt:

$$t_p^k = t_p^k, \qquad t_E^k = t_p^k.$$

Anforderungen an Signaleigenschaften

Die Bestimmung von Anforderungen beginnt mit der Befragung eines Experten. Hierbei wird der Druck als zeitkritische Eingangsgrößen beschrieben, deren logische Sampling-Rate gleich der Sampling-Rate des Moduls sein muss. Weiterhin wird gefordert, dass kein Aliasing auftreten darf, um die Korrektheit des geschätzten Parameters zu garantieren. Für die Erkennungszeit gibt es keine expliziten funktionalen Anforderungen. Somit werden keine zeitlichen Anforderungen an das Absolut-Alter bzw. des Daten-Alters des Eingangs benötigt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

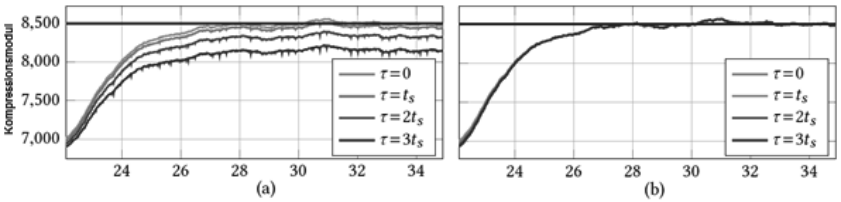


Bild 6: Schätzergebnisse für verzögerten a) Druck b) Druck und Winkel

Weiterhin ist grundsätzlich bekannt, dass sich die zeitliche Relation von Druck und Winkel auf die Genauigkeit auswirken könnte. Dieser Zusammenhang wird mithilfe eines Simulink-Modells der Komponente genauer untersucht. Die einzelnen Eingangssignale werden durch Sinus-Frequenzen generiert und der Zeitverzug durch Time-Delay Blöcke realisiert. Es werden zwei Szenarien analysiert. Im ersten Szenario wird nur der Druck und im zweiten Szenario der Druck und der Winkel verzögert. Dabei zeigt sich, dass die Verzögerung des Drucks ab einer zeitlichen Verzögerung von 2 Sampeln zu einem Offset-Fehler von 2% führt. Werden beide Größen verzögert, ist dieser Fehler nicht zu erkennen (Vgl. Abb. 6). Als Resultat dieser Untersuchung wird abgeleitet, das eine Verschiebung um ein Sample gerade noch tolerierbar ist. Das Ergebnis der Analyse wird für die Komponente dokumentiert (Vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Auszug aus der Komponentenbeschreibung

	Typ	Schnittstell(en)	Spezifikation
Verhalten	Delay	p	$t_p^k = t_p^k$
	Delay	E	$t_\alpha^k = t_p^k$
Anforderungen	Daten-Synchronität	p, α	$\zeta_{p,\alpha}^k \leq t_s$
	Logische Samplingrate	p	$\Delta t_x^k \approx t_s$
	Aliasing	p	kein Aliasing

Bestimmung der Signalpfade

Für die automatisierte Suche der Signalpfade werden zunächst alle anderen Komponenten analysiert und ihre Signaleigenschaften dokumentiert. Für die Schnittstelle Druck wird ein Signalpfad der Länge 11 und für die Schnittstelle Winkel ein Signalpfad der Länge 9 identifiziert. Das Ergebnis dieser Analyse für die Schnittstellen Druck und Winkel ist in Bild 7 aufge-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

zeigt. Hierbei werden die zu den Signalflüssen zugehörigen Komponenten farblich dargestellt.

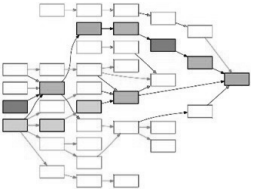


Bild 7: Ergebnisse der Signal-Analysen

Analyse der Echtzeitverhaltens und Abgleich mit Anforderungen

Das System ist ein Single-Core System, das mit festen Perioden gescheduled wird. Die Kommunikation so, dass Werte immer zu Beginn eines Tasks eingelesen und zur Beendigung des Tasks geschrieben werden. Weiterhin sind die periodischen Tasks harmonisch und offsetfrei. Somit kann der können die zwischen Tasks sehr einfach bewertet werden. Hierbei zeigt sich, dass der Druck jitterfrei mit der korrekten Samplingrate abgetastet wird, die Daten-Synchronität kleiner als ein Sample ist und Aliasing nicht auftritt. Die Anforderungen an die Signaleigenschaften der Komponente werden durch das System erfüllt.

Offensichtlich ist die Komplexität dieses Testsystems als gering einzuschätzen. Trotzdem demonstriert das Beispiel, dass die vorgeschlagene Methodik eine systematische Berücksichtigung von zeitlichen Signaleigenschaften ermöglicht.

Tabelle 2: Ergebnisse der Analyse

	Typ	Anforderung	Berechneter Wert
Anforderungen	Daten-Synchronität	$\zeta_{p,\alpha}^{k} \leq t_s$	$\zeta_{p,\alpha}^{k} \approx 0$
	Logische Samplingrate	$\Delta t_x^k \approx t_s$	$\Delta t_x^k = t_s$
	Aliasing	kein Aliasing	kein Aliasing

4. Zusammenfassung

In Arbeit demonstriert eine verbesserte Methodik für die Berücksichtigung von zeitlichen Signalanforderungen in Automotive Software. Der Kern der vorgeschlagenen Methodik bildet die Trennung zwischen der Bestimmung von zeitlichen Signalanforderungen für die einzelnen Komponenten und der Verifizierung dieser Anforderugnen anhand von globalen Wirketten. Der Ansatz bildet somit eine Möglichkeit, um fehlende Spezifikation von Automotive Software

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

zu und damit verbundene Integrationsfehler zu verhindern. Die Funktionsweise des Ansatzes wird anhand eines Anwendungsbeispieles aufgezeigt.

Literatur:

[1] Peraldi-Frati, M.-A. et al.: The timmo-2-use project: time modeling and analysis to use, Proceedings of the International Congress on Embedded Real Time Software and Systems, 2012.

[2] AUTOSAR, Specification of timing extensions v2.1.1 (r4.1), Mar. 2014.

[3] Wolff, C. et al.: Amalthea tailoring tools to projects in automotive software development, IDAACS'2015, 2015, S. 515–520.

[4] Faugere, M. et al.: Marte: also an uml profile for modeling aadl applications, Proceeding of the 12th IEEE International Conference on Engineering Complex Computer Systems, 2007, S. 359–364.

[5] Thiele, L. et al., Real-time calculus for scheduling hard real-time systems, in ISCAS 2000 Geneva, IEEE, vol. 4, 2000, S. 101–104.

[6] Henia, R. et al., "System level performance analysis - the symta/s approach", IEE Proceedings of Computers and Digital Techniques, 2005, S.148–166.

[7] Deubzer, M., Robust scheduling of real-time applications on efficient embedded multicore systems, PhD thesis, Technische Universität München, 2011.

[8] Larsen, K. G. et al., Uppaal in a nutshell, International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT), vol. 1, no. 1, S. 134–152, 1997.

[9] Mubeen S. et al., End-to-end timing analysis of black-box models in legacy vehicular distributed embedded systems, in 21st International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, IEEE, 2015, S. 149–158.

[10] Reinkemeier, P. et al., Contracts for schedulability analysis, in FORMATS 2015, 2015, S. 270–287.

[11] Sehnke, T. et al., Contract-Based Integration of Automotive Control Software, Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2017, S. 1611-1614.

[12] Baur, R. et al., Estimation of fuel properties in a common rail injection system by unscented kalman filtering. In 2014 IEEE Conference on Control Applications (CCA), 2014, S. 2040–2047.

[13] Hagberg, Aric A. et al, Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. In Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy2008), 2008, S. 11–15.

[14] Feiertag, N. et al., A compositional framework for end-to-end path delay calculation of automotive systems under different path semantics. In Workshop on Compositional Theory and Technology for Real-Time Embedded Systems (CRTS), 2008

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Machbarkeitsstudie zum virtuellen Trainieren und Testen von künstlichen neuronalen Netzen

Feasibility Study for the virtual Training and Testing of Artificial Neural Networks

Dipl.-Ing. **Martin Kehrer**, M. Eng. **Matthias Hisung**,
Prof. Dr.-Ing. **Hans-Christian Reuss**, Universität Stuttgart,
Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK), Stuttgart

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird die Machbarkeit des virtuellen Trainieren und Testen von neuronalen Netzen untersucht. Dabei wird ein entsprechendes Software Framework und vorhandene Hardware Infrastruktur vorgestellt, welche die Integration von Sensoren und Entwicklungsplattformen in verschiedenen Systemtiefen ermöglicht. Für die dabei notwendige Generation der synthetischen Datensätze werden zwei Engines genutzt: OpenSceneGraph und Unreal Engine 4. Es wird dabei ein Konverter vorgestellt, der es erlaubt die Objekte zwischen den beiden Tools zu konvertieren. Am Beispiel der neuronalen Netze SegNet und ENet werden anschließend der Nutzen und die Verwendungsmöglichkeiten untersucht.

Abstract

In this paper, the feasibility of virtual training and testing of neural networks is investigated. Therefore a corresponding software framework and existing hardware infrastructure has been established to allow the integration of various types of sensors and development platforms at different system levels. Two engines are used to generate the synthetic database: OpenSceneGraph and Unreal Engine 4. Through the usage of a converter the objects can be exchanged between both engines. Based on the neural networks SegNet and ENet the usefulness and the range of applications will be examined.

1. Einleitung

Das Aufkommen des autonomen Fahrens bedingt zunehmend die Integration von weiteren Sensoren in das Auto zwecks besserer Umwelterkennung. Diese Sensoren ermöglichen mit der entsprechenden Software eine Erkennung unterschiedlicher Objekte wie Straßenmarkierungen, Personen oder Fremdfahrzeuge. Hierzu können verschiedene Algorithmen eingesetzt werden, einer davon ist das Deep Learning. Beim Deep Learning wird ein neuronales

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Netz mit einem Datensatz, der neben den Eingangsdaten auch die gewünschten Ausgangswerte die sogenannte Ground Truth enthält, trainiert. Nach erfolgtem Training kann das resultierende Modell mit einem weiteren Datensatz getestet und die Performance ermittelt werden. Zum Trainieren und Testen wird daher ein Datensatz mit den Eingangsdaten und der Ground Truth benötigt. Der Aufbau einer solchen Datenbank ist im Falle von neuronalen Netzen zur Bildsegmentierung sehr aufwendig, da die Ground Truth Daten manuell erstellt werden müssen (siehe Bild 1).



Bild 1: Datensatz aus Eingangsbild und Ground Truth (hier: KITTI [8])

Durch die Verwendung von Imagegeneratoren am Stuttgarter Fahrsimulator kam die Idee auf, ob man diese nicht für den Aufbau einer derartigen Datenbank mit automatischer Generierung der Ground Truth verwenden kann. Darüber hinaus soll die erzielte Performance mit synthetischen Daten mit der Realität validiert werden. Anschließend erfolgt eine Untersuchung ob die virtuell trainierten Modelle in der realen Welt verwendet werden können. In [3] und [4] werden die Vorteile durch die Verwendung von synthetischen Daten aufgezeigt.
Die nachfolgenden Kapitel beschreiben den Aufbau eines Prüfstands, der das Testen von Fahrerassistenzsystemen erlaubt. Dabei soll ein HiL zum Testen von Kamerasystemen geschaffen werden, sowie eine Softwareumgebung, die die unterschiedlichen Deep Learning Frameworks einbindet. Zuletzt soll am Beispiel der neuronalen Netze SegNet [1] und ENet [2] die mögliche Performancesteigerung untersucht werden.

2. Hardware

Neben einem Rechner mit relativ hoher GPU Leistung wird zum Testen von Kamerasystemen bzw. Sensoren ein Prüfstand benötigt, der entsprechende Schnittstellen bereitstellt. Die aufgebaute Umgebung erlaubt das Testen folgender Systemkonfigurationen: Software in the Loop (SiL), Hardware in the Loop (HiL) Half und Full Mode.
Im SiL wird ausschließlich die Software des Systems getestet. Dazu werden die notwendigen Eingangsdaten entweder direkt über einen Imagegenerator (IG) erzeugt oder über eine geeignete Datenschnittstelle, wie den Runtime Data Bus (RDB) bereitgestellt. Die Ausgangsda-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

ten der Testumgebung können über verschiedene Schnittstellen (UDP, TCP, CAN) ausgegeben und weiteren Simulationen/Sensoren bereitgestellt werden. Dabei ist in dem Fall von z.B. der Detektion von Fremdverkehr eine online Performancebestimmung möglich.

Im HiL Half Mode wird die Hardware des Systems mit einbezogen. Allerdings werden in dieser Konfiguration die Eingangsdaten noch über Shared-Memory bereitgestellt und nicht über die eigentliche Schnittstelle der zu testenden Hardware mit seinem Umfeld. Auch hier ist die Verwendung aller Sensortypen möglich, falls eine entsprechende Eingangsschnittstelle bereitgestellt werden kann.

Im HiL Full Mode verarbeitet der Sensor jetzt die Daten, die ihm über seine reale Schnittstelle bereitgestellt werden. Andere Sensoren, die nicht auf einem Kamerasystem basieren, sind in dieser Konfiguration nicht möglich. Neben intelligenten Sensoren, die z.B. Objekte im Eingangsbild erkennen und diese als Ausgang liefern, können auch einfache Kamerasysteme eingebunden werden, die das Bild über Ethernet (ETH), FireWire (FW) oder Universal Serial Bus (USB) ausgeben. Bei „Black Box“ Systemen wie z.B. das Mobileye 560 System muss die Software bzw. der Ablauf zur Kamerakalibrierung bekannt sein. Bild 3 verdeutlicht die unterschiedlichen Konfigurationen mit den entsprechenden Signalflüssen und Systemgrenzen. Im Rahmen des Verbundprojekts „Zuverlässigkeit und Sicherheit von Elektrofahrzeugen (ZUSE)“ gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) konnten im SiL-Modus der Bosch LRR3 Radarsensor und die Sick Laserscanner LMS511, im HiL-Modus Half/Full Mode die Kameraplattform D3 von VRmagic und im Full Mode das Mobileye-System getestet werden. Aktuell werden für die Entwicklungsplattform NVIDIA DRIVE PX 2 entsprechende Treiber entwickelt um eine Integration im HiL Half Mode zu ermöglichen.

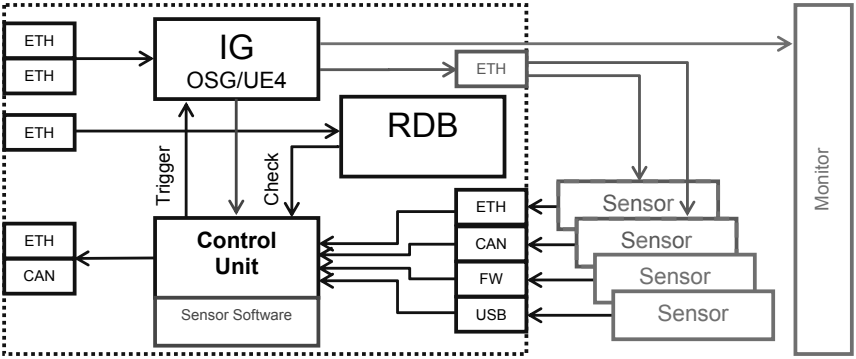


Bild 3: Systemkonfigurationen: SiL (blau), HiL Full Mode (grün) und Half Mode (rot)

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Das System wurde zusätzlich um mehrere GPUs erweitert, um zum einen eine hohe Performance der Imagegeneratoren zu erreichen und zum anderen ein Trainieren und Testen von Neuronalen Netzen zu ermöglichen.

3. Framework

Das Framework umfasst neben der Software zur Bedienung des Prüfstands (Auswahl Systemkonfiguration usw.) auch Imagegeneratoren zur Erzeugung von synthetischen Sensorrohdaten sowie die Deep Learning Frameworks Caffe und Torch.

3.1 Imagegeneratoren

Für die Erzeugung synthetischer Sensordaten stehen eine Vielzahl von Tools zur Verfügung. Die Entscheidung für die Software fiel auf OpenSceneGraph OSG und Unreal Engine UE4. OpenSceneGraph ist ein Szenengraphensystem, das es erlaubt große Szenarien in Echtzeit zu rendern. Durch die quelloffene Engine können eigene Änderungen eingebracht werden und somit die Eigenschaften von Sensoren abgebildet werden. Auch die IG von Virtual Test Drive VTD beruhen auf dieser Engine. Die Erfahrungen der letzten Jahre zeigten allerdings, dass OSG bezüglich Lichteffekten nicht die geeignetste Umgebung ist. Auch die angebotenen Funktionen besitzen nicht den Umfang der Alternativen. Aufgrund dieser Mankos wird neben OSG auch Unreal Engine UE4 verwendet.
UE4 besitzt im Vergleich zu OSG eine große Anzahl an Funktionen und stellt viele Lichttechniken bereit. Des Weiteren existieren eine Vielzahl von Erweiterungen wie Enlighten, Speedtree usw. die die Szenerie noch realistischer wirken lassen. Die Landschaften und Objekte, die bisher in OSG erstellt wurden, werden nun über das Filmbox Format (FBX) nach UE4 portiert. Die Standard-Konvertierung OSG-FBX über das von OSG bereitgestellte Tool osgconv wurde um einige Aspekte erweitert:

1. Alle Materialeigenschaften der Objekte werden in der OSG Datei hinterlegt. Dabei integriert man z.B. die Materialeigenschaften und Shader, die erst zur Laufzeit parametriert werden
2. Bei der Konvertierung von OSG nach FBX werden die dynamischen Komponenten berücksichtigt und separat exportiert. Dynamische Komponenten sind z.B. die verschiedene Level of Details (LODs) von Objekten, separat bewegliche Teile (z.B. Autoreifen) sowie zuschaltbare visuelle Komponenten (z.B. Fahrzeuginsassen).
3. Anschließend erfolgt der Zusammenbau alle exportierten Komponenten zu einem Objekt. Dabei können aktuell im Falle von Fahrzeugen noch nicht alle Bestandteile in ei-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

ner Datei zusammengeführt werden, da der UE4 FBX Import nur eine LOD Ebene erlaubt und somit hintereinander gereihte LODs nicht eingelesen werden können.

Bild 4 zeigt eine Beispielszene mit beiden Engines dargestellt. Aktuell sind noch nicht alle Shader bzw. dynamischen Funktionen von OSG insbesondere von VTD nach UE4 portiert. Vor allem die Beeinflussbarkeit der Straßenbeschaffenheit (trocken/nass, Schnee) sowie die Kontrolle von Ampelanlagen fehlen derzeit. Die nachfolgenden Untersuchungen werden daher mit OSG durchgeführt.
Die erforderliche Ground Truth wird durch Austausch der entsprechenden Shader der Objekte erzeugt. Dadurch wird z.B. ein Fahrzeug nicht mehr basierend auf verschiedenen hinterlegten Texturen und Materialeigenschaften gerendert, sondern mittels einer Farbe dargestellt.



Bild 4: Imagegeneratoren VTD IG (links) und UE4 IG (rechts)

3.2 Neuronale Netze

Aktuell sind die beiden Deep Learning Frameworks Caffe und Torch integriert. Veröffentlichungen wie [5] und [6] untersuchen die verschiedenen Eigenschaften der Frameworks und machen deutlich, dass jedes Framework seine eignen Stärken und Schwächen besitzt. Aufgrund der gegenwärtigen Vielzahl an entwickelten neuronalen Netzen und der Integration von Caffe und Torch in NVIDIA DIGITS entschied man sich für diese beiden Frameworks. Dabei wurde aus jedem Framework ein umgesetztes neuronales Netz gewählt: SegNet aus Caffe und ENet aus Torch. Bei beiden Netzen handelt es sich um sogenannte Convolutional Neural Networks (CNNs) zur pixelweisen Bildsegmentierung. Andere Netzarchitekturen in diesem Bereich sind z.B. DeepLab [11], FCN [12], DeconvNet [13] und ResNet [14].

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

3.2.1 SegNet

Das SegNet besitzt mehrere Layer mit einem Bild als Eingang, einem Paket aus Encodern und Decodern und einem segmentierten Bild als Ausgang. Als Eingangsbild kann jedes RGB-Bild oder Tiefenbild verwendet werden, das als Vorverarbeitung eine lokale Kontrastnormierung (LCN) erfährt, um Kanten hervorzuheben und eine Korrektur einer ungleichmäßigen Beleuchtung durchzuführen. Der letzte Layer klassifiziert jeden Pixel unabhängig voneinander, wodurch das Ausgangsbild so viele Kanäle wie Klassen besitzt. Dabei können auch die Modellunsicherheiten für jede Klasse ausgegeben werden [9]. Das Training des Netzes erfolge mit der Limited-memory Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno (L-BFGS) Methode. Dabei werden erst die äußeren Encoder und Decoder trainiert und anschließend die tieferen Encoder-Decoder Paare optimiert, wobei hier die Gewichte der äußeren Paare unveränderlich sind.

3.2.2 ENet

ENet besteht aus einem Initialblock, drei Encoder- und zwei Decoder-Blöcken. Bei dem Design standen vor allem eine geringe Laufzeit und ein geringer Hardwarebedarf im Vordergrund. Daher wird in dem Initialblock drastisch die Eingangsgröße reduziert. Im Gegensatz zu SegNet gibt es hier keine Encoder-Decoder Paare, sondern eine höhere Anzahl an Encodern als Decodern. Die Decoder werden im Prinzip nur zum Hochsampeln des Ausgangs verwendet. Das Training erfolgt mittels des Adam Optimierungsalgorithmus. Dabei werden erst die Encoder trainiert um die runtergesampelten Regionen des Eingangsbildes zu Clustern und anschließend die Decoder um eine pixelweise Klassifikation des Bildes zu erhalten.

4. Untersuchung

Um die Vorteile bzw. die Anwendbarkeit von synthetischen Datensätzen zu untersuchen, wurden die beiden Netze SegNet und ENet mit einem verkleinertem CamVid Datensatz [7] trainiert und anschließend getestet. Das SegNet-Web wurde auf einem größeren Datensatz bestehend aus CamVid, KITTI usw. trainiert und auch auf demselben Datensatz getestet.

Tabelle 1: Durchschnittliche Intersection-over-Union IoU über den CamVid Testdatensatz

	Sky	Building	Pole	Road	Pavement	Tree	SignSymbol	Fence	Car	Pedestrian	Bicyclist
SegNet-Web	88.55	66.16	19.03	80.38	78.32	59.67	24.65	18.30	51.25	27.47	8.84
SegNet-Web-Syn	88.55	66.16	19.03	80.38	78.33	59.67	24.65	18.29	51.25	27.47	8.84
SegNet	88.01	58.09	6.61	79.86	49.41	45.41	3.51	3.18	34.84	7.23	1.37
SegNet-Syn	87.67	60.92	4.81	81.28	74.60	44.62	3.54	1.69	38.61	4.19	1.63
ENet	80.63	52.68	5.68	77.47	55.06	41.67	7.68	2.34	37.15	5.61	1.39
ENet-Syn	80.32	47.87	5.23	81.08	54.52	42.94	10.55	4.54	41.24	8.17	1.56

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Die Auflistung in Tabelle 1 zeigt die deutlich bessere Performanz des SegNet-Web Netzes. Dies beruht auf dem größeren Datensatz der zum Training einbezogen wurde. Bei der Anwendung der Netze auf einer Sequenz von synthetischen Bildern können dieselben Unterschiede in der Genauigkeit beobachtet werden. Allerdings wird in Bild 5 ersichtlich, dass auch Netze mit großen Trainingsmengen in bestimmten Situationen an Genauigkeit verlieren können (Bereich 230 – 270 in der Bildersequenz). In diesem Fall verursachte ein zu dichter Fremdverkehr Fehler bei der Segmentierung. Bild 6 zeigt beispielhaft die Ausgabe der Netze in diesem problematischen Scenario.

Aufgrund der festgestellten Problemstelle wurde ein synthetischer Trainingsdatensatz von Autobahn-Szenarien mit zu dichtem Fremdverkehr erstellt und die Netze darauf trainiert. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, zeigte sich bzgl. den CamVid Testdaten keine Verbesserungen bei dem SegNet-Web Netz. Bei den anderen zwei Netzen kam es zu geringen Veränderungen im Bereich von 4%. Die Pavement Klassifikation von SegNet wurde jedoch um 24% gesteigert. Die fast unveränderten Werte sind darin begründet, dass die zusätzlichen synthetischen Daten komplett aus einem anderen Bereich (Autobahn) stammen und somit nicht die Merkmale aufweisen, die bei den Testdaten aus einem innerstädtischen Szenario erforderlich sind.

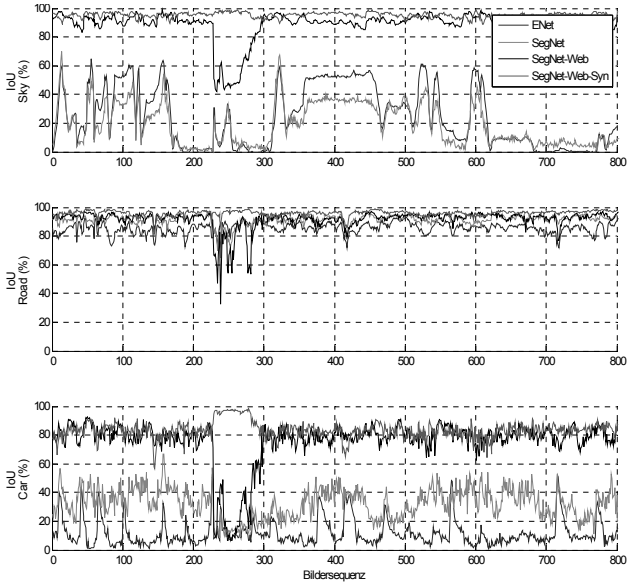


Bild 5: Intersection-over-Union IoU von SegNet-Web, SegNet-Web-Syn, SegNet und ENet

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

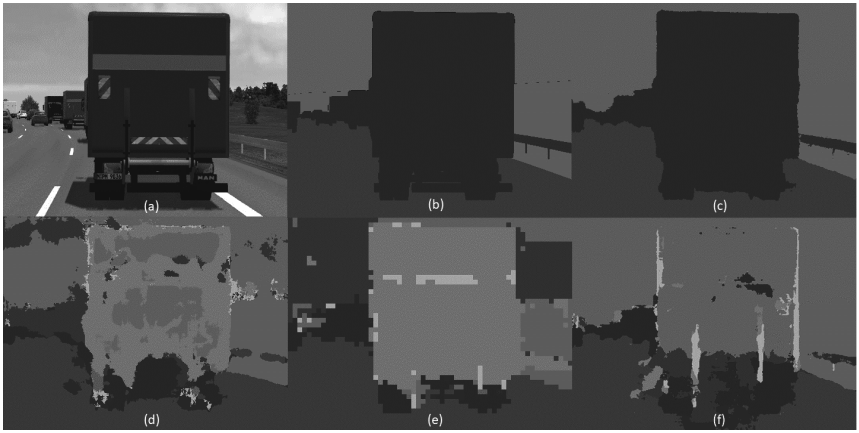


Bild 6: Ausgabe von SegNet-Web-Syn (c), SegNet-Web (f), SegNet (d) und ENet (e) bei dem Eingangsbild (a) mit der Ground Truth (b)

Unter Hinzunahme der synthetischen Daten konnte das Problem mit der Segmentierung bei zu dichtem Fremdverkehr behoben werden (siehe Bild 5 und 6). Allerdings wurde bisher nur die Überprüfung anhand von synthetischen Bildern vollzogen mit denen das Netz bereits vorher trainiert wurde. Das nachfolgende Bild 7 zeigt das Resultat der Segmentierung eines Realbildes bei der Verwendung von SegNet jeweils trainiert mit bzw. ohne den synthetischen Datensatz. Es ist deutlich eine bessere Erkennung zu beobachten, wobei durch die bessere Detektion des Fremdverkehrs Straßenmarkierung der Ausfahrt erkannt werden konnten.



Bild 7: Realbild (b) segmentiert mit SegNet-Web (a) und SegNet-Web-Syn (c)

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Ausblick

Die Untersuchung hat gezeigt, dass Situationen mit schlechten Erkennungsraten mit synthetischen Daten nachtrainiert werden können. Es ist dabei erforderlich, dass die Bilder auch das entsprechende Scenario abbilden in dem das Problem besteht. Eine allgemein mögliche Steigerung der Erkennungsraten muss mit weiteren Untersuchungen überprüft werden. Die bisherige manuelle Auswahl und Erstellung der synthetischen Zusatzdaten soll noch automatisiert werden, um eine schnellere Optimierung zu ermöglichen. Mit einem kommenden Upgrade der Grafikleistung am Stuttgarter Fahrsimulator soll zum einen der Imagegenerator auf Basis von UE4 eingesetzt werden und zum anderen ein Deep Neural Network Cluster verwendet werden. Die eventuelle Genauigkeitsunterscheidung bei einem Training mittels OSG oder UE4 gerenderten Bildern sollen daraufhin untersucht werden. Des Weiteren sollen neuronale Netze mit deutlich größeren Datensätzen trainiert und getestet werden. Der FKFS Rundkurs wird hierfür in OSG abgebildet und anschließend nach UE4 portiert. Durch die am Fahrsimulator verfügbaren Schnittstellen können neue Konzepte wie die Kombination von Spatial Transform Networks [10] mit den CNNs untersucht werden. Es sollen z.B. die Daten des elektronischen Horizonts genutzt werden um die CNN Eingangsbilder entsprechend zu transformieren.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literatur:

[1] Badrinarayanan V.; Handa A.; Cipolla R.: SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Robost Remantic Pixel-Wise Labelling. arXiv:1505.07293, 2015

[2] Pazke A.;Chaurasia A.;Kim S.;Culuciello E.: ENet: A Deep Neural Network Architecture for Real-Time Semantic Segmentation. arXiv:1606.02147, 2016

[3] Handa A.; Patraucean V.; Badrinarayanan V.; Stent S.; Cipolla R.: SceneNet: Understanding Real Worl Indoor Scenes With Synthetic data. arXiv:1511.07041, 2015

[4] Ros G.; Sellart L.; Materzynska J.; Vazquez D.; Lopez A.M.: The SYNTHIA Dataset: A Large Collection of Synthesis Images for Semantic Segmentation of Urban Scenes. CVPR, 2016

[5] Kovalev V.; Kalinovsky A.; Kovalev S.: Deep Learning with Theano, Torch, Caffe, TensorFlow, and Deeplearning4J: Which One Is the Best in Speed and Accuracy? PRIP, 2016

[6] Bahrampour S.; Ramakrishnan N.; Schott L.; Shah M.: Comparative Study of Deep Learning Software Frameworks. arXiv: 1511.06435, 2015

[7] Brostow G.; Fauqueur J.; Cipolla R.: Semantic object classes in video: A high-definition ground truth database. PRL, 30(2) pp. 88-97, 2009

[8] Geiger A.; Lenz P.; Urtasan R.: Are we ready für autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite. CVPR, pp. 3354-3361, 2012

[9] Kendall A.; Badrinarayanan V.; Cipolla R.: Bayesian SegNet: Model Uncertainty in Deep Convolutional Encoder-Decoder Architectures for Scene Understanding. arXiv:1511.02680, 2015

[10] Jaderberg J.; Simonyan K.; Zisserman A.; Kavukcuoglu K.: Spatial Transformer Networks. NIPS, pp. 2017-2025, 2015

[11] Liang-Chen C.; Papandreou G.; Kokkinos I.; Murphy K.; Yuille A. L.: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets and Fully Connected CRFs. ICLR, 2015

[12] Long J.; Shelhamer E.; Darrell T.: Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation. CVPR, 2015

[13] Noh H.: Hong S.; Han B.: Learning Deconvolution Network for Semantic Segmentation. ICCV, 2015

[14] He K.; Zhang X.; Ren S.; Sun J: Deep Residual Learning for Image Recognition. arXiv:1512.03385, 2015

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

CaliSim – Calibration by Simulation

Virtuelle Applikation elektromechanischer Lenkungen

Virtual calibration of electromechanical steering systems

Dr.-Ing. **M. Bauer**, Dipl.-Ing. **R. Mannale**,
Dr.-Ing. **M. Kochem**, Adam Opel GmbH, Rüsselsheim;
MSc. **A. Ravi**, AVL List GmbH, Graz

Kurzfassung

Es wird eine Methode zur virtuellen Auslegung und Applikation von elektromechanischen Lenkungen beschrieben. Die Methode ist in fünf Arbeitsschritte unterteilt und skizziert die notwendigen Maßnahmen einer virtuellen Applikation. Beginnend mit der Vorstellung der Methode wird anschließend an einem konkreten Beispiel die Leistungsfähigkeit demonstriert. Anhand der modellbasierten Applikation von zwei Teilfunktionen (Lenkunterstützung und Aktiver Rücklauf) wird gezeigt, wie durch statistische Versuchsplanung, Metamodellierung und anschließende Optimierung ein ideales Parametersetup für eine virtuelle ECU gefunden werden kann. Eine in die Methode integrierte Validierung der Modelle, der objektiven Kenngrößen und der Zielwerte garantiert eine systematische Überprüfung der Modelle und Zielvorgaben.

Abstract

This paper presents a method for the virtual design and calibration of electromechanical steering systems. The method is divided into five steps and outlines the necessary measures of a virtual application. After explaining the concept of the method, its performance is demonstrated using a concrete example. Based on the model-based application of two subfunctions (steering assistance and active return), it is shown how an ideal parameter setup for a virtual ECU can be found by means of statistical experiment design, meta-modeling and optimization. The method includes an integrated validation of the models, the objective parameters and the target values; thus, guaranteeing a systematic review of the models and the target values.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1. Einleitung

Um den Anforderungen an den Entwicklungsprozess und dem gestiegenen Kostendruck in der Entwicklung gerecht zu werden, wird der Einsatz rechnergestützter Simulation in der Automobilindustrie stetig ausgebaut. Bei Opel wird seit ca. 13 Jahren die Road-Lab-Math Strategie (RLM) verfolgt. RLM hat zum Ziel, die Entwicklungsaktivitäten zwischen Fahrversuch, Labor und Simulation so zu verteilen, dass die maximalen Synergie-Effekte für die Entwicklung ausgenutzt werden können. Ferner soll durch die Verlagerung der Entwicklungsaktivitäten weg von der Straße ins Labor (z.B. HiL, Hardware-in-the-Loop Simulation) oder auf den Rechner (SiL, Software-in-the-Loop Simulation) die Zahl von Prototypenfahrzeugen massiv reduziert und gleichzeitig die Entwicklungszeit verkürzt werden, [1]. Nach erfolgreicher Entwicklung von Fahrdynamik-Regelsystemen gemäß der RLM-Strategie [2] sollen weitere Komponenten nach dieser Strategie entwickelt und appliziert werden.

Bild 1 zeigt den klassischen Applikationsprozess einer Fahrdynamikregelfunktion zusammen mit den in dieser Arbeit dargestellten Erweiterungen, angelehnt an [3]. Im klassischen Applikationsprozess wird ausgehend von einer initialen Parametereinstellung, welche in der Regel aus dem Vorgängermodell oder einem ähnlichen Fahrzeugtyp resultiert, die Regelungsfunktion bedatet. Der Applikateur führt ein Fahrmanöver durch und nimmt mit seinen Sinnesorganen Fahrzeugreaktionen wahr. Anschließend kombiniert er verschiedene Wahrnehmungskanäle und bildet subjektive Kriterien, welche er anhand seiner Erfahrungen und seinem Expertenwissen mit konkreten Reglerparametern verbindet. Diese Reglerparameter passt er nach der one-factor-at-a-time-Methode (OFAT) entsprechend dem gewünschten Fahrverhalten an. Der Applikateur besitzt ein internes Fahrverhaltensmodell (Idealvorstellung) mit dem er das aktuelle Fahrverhalten des Fahrzeugs vergleicht. Mit einer weiteren Testfahrt überprüft er seine Parameteränderung. Diese Schleife wird so lange durchlaufen, bis die Anforderungen an die Regelung erfüllt sind.
Der wesentliche Nachteil des klassischen Applikationsprozesse ist der iterative Ansatz. Die Suche nach einem Optimum ist vom Ausgangspunkt der Tests abhängig. Ferner steigt mit der Anzahl relevanter Abstimmungsparameter auch die Gesamtkomplexität.
Dieser klassische Applikationsprozess ist nicht nur sehr zeit- und kostenintensiv, sondern auch von den individuellen Erfahrungen der Applikateure abhängig.

In dieser Arbeit wird der oben beschriebene klassische Applikationsprozess durch modellbasierte Methoden abgebildet und ein Werkzeug zur Unterstützung des Applikateurs präsentiert. Anhand von Simulationsmodellen soll die virtuelle ECU (vECU), das Sensorverhalten

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

und die Bewegung des Fahrzeugs rekonstruiert werden. In dem Block Sensorfusion werden die virtuellen Sensorsignale fusioniert. Aus diesen Signalen werden objektive Kenngrößen (OK) berechnet und mit Hilfe von Statistischer Versuchsplanung (DOE, Design of Experiments) Metamodelle gebildet. Ziel ist hierbei, durch Metamodelle eine

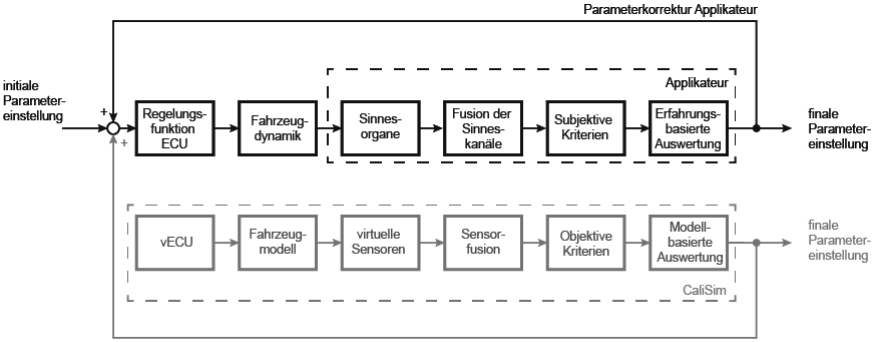


Bild 1: Ablauf des klassischen Applikationsprozesses (schwarz) und der CaliSim-Methode (grau):

Korrelation zwischen den Applikationsparametern (Eingangsvariablen) und den objektiven Kriterien (Ausgangsgrößen) unter Verwendung der minimalen Anzahl von Experimenten zu finden. Abschließend wird anhand der Metamodelle durch eine Optimierung ein ideales Parametersetup in der Simulation bestimmt. Je nach Projektphase kann dieses Parametersetup als Richtwert für den Applikateur oder als initiale Parametereinstellung verwendet werden.

Im Folgenden wird zunächst die Methode Calibration by Simulation (CaliSim) zur virtuellen Applikation und Analyse von elektromechanischen Lenkungen (EPS) beschrieben. Anschließend wird an einem Anwendungsbeispiel die Leistungsfähigkeit der Methode demonstriert.

2. CaliSim – Calibration by Simulation

Die Methode besteht aus fünf Arbeitsschritten: Objektivierung, Modellbildung, Erzeugen von Metamodellen, Analyse und Validierung, Bild 2. Die fünf Arbeitsschritte werden weitestgehend unabhängig voneinander und von Experten unterschiedlicher Disziplinen bearbeitet. So wird z.B. Objektivierung vom Fahrversuch verantwortet, während Modellbildung und Korrela-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

tion vom Simulationsbereich durchgeführt werden. Die einzelnen Arbeitsschritte der Methode werden nachfolgend näher erläutert.

2.1 Objektivierung

Die Anforderungen an das Fahrverhalten werden weitestgehend auf Basis subjektiver Kundenanforderungen formuliert. Zur modellbasierten Applikation gilt es die subjektiven Kundenanforderungen in objektive Kriterien zu übersetzen. Deshalb wird in diesem Arbeitsschritt ein modellgestütztes Bewertungskonzept zur Fahrdynamikanalyse bereitgestellt, siehe [3]. Basierend auf Fahrdynamikmodellen werden charakteristische Werte (objektive Kriterien) zur Beurteilung standardisierter Testfahrten bestimmt. Kern des Bewertungskonzepts ist ein Bewertungsmodell. Das Bewertungsmodell bildet einen funktionalen Zusammenhang zwischen objektiven Kriterien und dem subjektiven Empfinden der Applikationsingenieure aus dem Fahrversuch ab, siehe [3, 4].

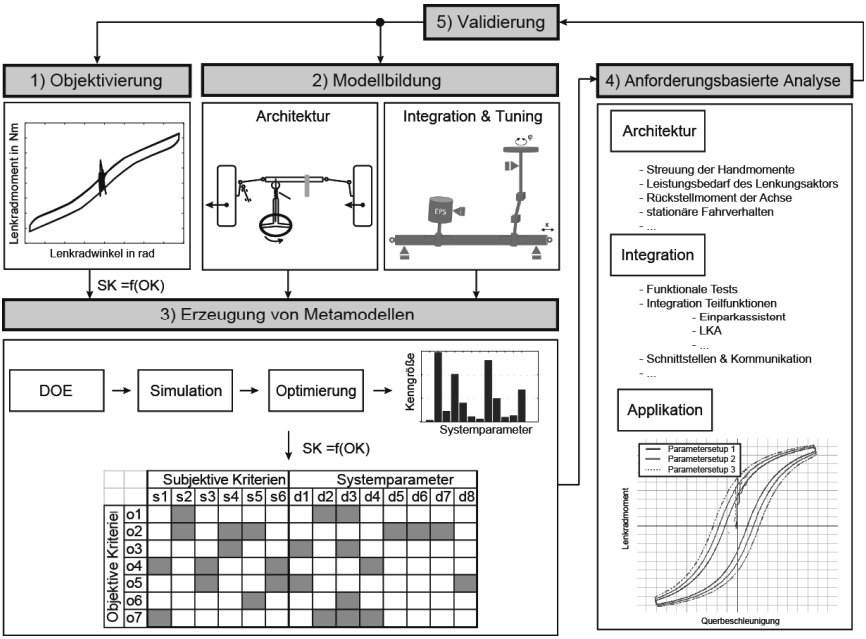


Bild 2: Die fünf Arbeitsschritte der CaliSim-Methode

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2.2 Modellbildung

Die Modellbildung dient zum einen dem Systemverständnis. Zum anderen ermöglichen die Modelle eine Prädiktion des Systemverhaltens bei einer Variation der Systemparameter. Grundlage des Gesamtfahrzeugmodells ist bei Opel das sogenannte Mastermodell. Hierbei handelt es sich um eine in Simulink angelegte Modellmaske, die die einzelnen Fahrzeugkomponenten (Submodelle) zu einem Gesamtmodell verbindet. Die Submodelle sind in Modellbibliotheken angelegt. Jedes Subsystem lässt sich unabhängig vom restlichen Simulationsmodel frei konfigurieren. Auf Grundlage dieses Mastermodells lassen sich für jeden Anwendungsfall maßgeschneiderte Fahrdynamikmodelle einfach zusammenstellen. Der Mastermodell-Ansatz wird für Offline Simulationen (MiL, SiL) und HiL-Anwendungen in Verbindung mit der Simulationsumgebung CarMaker von IPG angewendet. Eine detaillierte Beschreibung des Mastermodell-Ansatzes wird in [5, 6] gegeben.

Für die EPS ergeben sich die in Bild 3 aufgeführten Schnittstellen. Die Modellierung der EPS ist in ein mechanisches Lenkungsmodell und eine virtuelle ECU (vECU) unterteilt. Die vECU entspricht einem virtuellen Steuergerät. Sowohl das komplette Lenkungsmodell als auch die Submodelle können durch den Mastermodell-Ansatz variiert werden.

2.3 Erzeugung von Metamodellen

Im diesem Arbeitsschritt werden die Informationen aus der Objektivierung und der Modellbildung zusammengeführt. Durch die hohen Anforderungen an die Modellgüte ist die Komplexität der Submodelle und des Gesamtfahrzeugmodells gestiegen. Die Systemkomplexität erschwert eine Wirkkettenanalyse. Vor allem Auswirkungen von Parameteränderungen außerhalb der Systemgrenzen (z.B. Fahrwerk, Reifen) auf objektive Lenkungskriterien lassen sich nur noch schwer nachvollziehen. Deshalb wird mit statistischer Versuchsplanung (DoE - Design of Experiments), Simulation und anschließender Optimierung die Wirkung von Systemparametern unter dem Einfluss von Störparametern auf objektive Kriterien untersucht, [7]. Ziel ist es Metamodelle zu bestimmen, welche einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Systemparametern und den objektiven Kriterien formulieren. Statistische Verfahren helfen somit, die Wechselwirkungen zwischen Lenkungsmechanik, Lenkungssoftware und Gesamtfahrzeugverhalten transparent zu machen. Fasst man die so gewonnenen Informationen aus Objektivierung und Metamodellierung zusammen, ergibt sich eine Wirkkettenmatrix [8], die Systemparameter, objektive Kriterien und subjektive Kriterien verknüpft, Bild 2.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

2.4 Analyse

Die Wirkkettenmatrix, wie in Bild 2 beispielhaft dargestellt, ist überbestimmt und somit nicht invertierbar. Es gibt mehr Systemparameter als objektive Kriterien. Ferner kann ein Systemparameter mehrere objektive Kriterien beeinflussen. Zudem sind die Einflüsse in der Regel

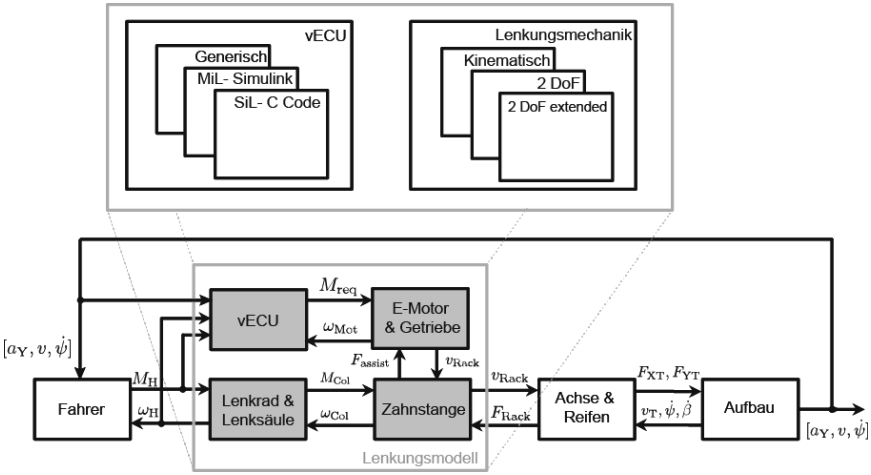


Bild 3: Schnittstellen des Lenkungsmodells: Alle grau hinterlegten Blöcke können vom Anwender separat getauscht werden. Die Symbole sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Bezeichnungen der Symbole aus Bild 4.

Symbol	Bezeichnung
a_Y	Querbeschleunigung
v	Fahrzeuggeschwindigkeit
$\dot{\psi}$	Gierrate
M_H	Handmoment
ω_H	Lenkradwinkelgeschwindigkeit
M_{Col}	Moment an der Zwischenwelle
ω_{Col}	Winkelgeschwindigkeit der Zwischenwelle
v_{Rack}	Geschwindigkeit der Zahnstange
F_{Rack}	Zahnstangenkraft

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$F_{XT}; F_{YT}$	Reifenkräfte
M_{req}	Sollmoment des Motors
ω_{Mot}	Motordrehzahl

nichtlinear und damit vom aktuellen Fahrzustand abhängig. Somit kann eine Fahrzeugauslegung basierend auf objektiven Kriterien nicht direkt erfolgen. Vielmehr muss die Auslegung der Designvariablen zumindest teilweise iterativ erfolgen. Angelehnt an [9 bis 11], wird hier ein dreiphasiger Prozess (Architektur, Integration und Applikation) verwendet. Zunächst werden in der Architekturphase mit Minimalmodellen die wichtigsten Fahrwerkseigenschaften und Auswirkungen auf die Lenkung untersucht. Die Lenkunterstützung wird nicht berücksichtigt. Anhand detaillierter Modelle werden in der Integrationsphase dynamische Effekte und zuvor vernachlässigte Freiheitsgrade untersucht. Lenkfunktionen werden integriert und plausibilisiert. In der Applikationsphase folgt die eigentliche Applikation der Softwaregrößen. Durch die Abstimmung der Regelfunktionen wird das Lenk- und Fahrverhalten an die gewünschten objektiven Kennwerte angepasst. Für alle drei Teilaufgaben im Entwicklungsprozess werden hier simulationsbasierte Werkzeuge zur Verfügung gestellt, die in einer Testautomatisierung zusammengefasst sind, siehe [12].

2.5 Validierung

Voraussetzung für die virtuelle Auslegung und Analyse von Systemen ist eine Simulationsumgebung, die die Realität hinreichend genau abbildet. Ebenso wichtig ist es, die geeigneten objektiven Kriterien und Zieleigenschaften gewählt zu haben. Denn sonst wird unter Umständen gegen einen falschen Wert optimiert. Deshalb ist in die CaliSim-Methode ein Validierungsschritt integriert, der sowohl die verwendeten Zielwerte als auch die Güte der Simulationsmodelle überprüft. Eine solche, im Laufe der Entwicklung ständig wiederholte Validierung einzelner charakteristischer Fahrmanöver dient zur Grundabsicherung der Simulationsmodelle, der objektiven Kennwerte und der Zieleigenschaften. Durch eine kontinuierliche Validierung der Simulationsmodelle ergibt sich eine Konvergenz der Simulationsgüte gegen die Realität im Sinne einer ständigen Genauigkeitssteigerung, [1].

3. Anwendungsbeispiel

Nachfolgend soll Schritt drei und vier der CaliSim-Methode näher erläutert und an einem konkreten Anwendungsbeispiel demonstriert werden. Bild 4 zeigt den Workflow und die verwendeten Softwarewerkzeuge zur modellbasierten Applikation. Zu Beginn wird in einer Planungsphase (Planning) die Aufgabenstellung konkretisiert. Neben dem Manöver, dem Prüf-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

ling und der zu variierenden Parameter, werden ferner die objektiven Kriterien definiert. In diesem Anwendungsbeispiel sollen zwei Teilfunktionen (Lenkunterstützung und Aktiver Rücklauf) einer virtuellen ECU appliziert werden. Für detaillierte Beschreibung der Funktionen

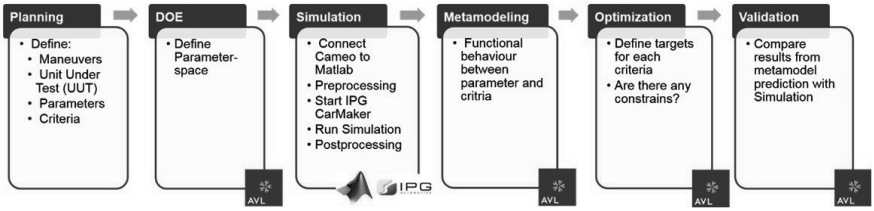


Bild 5: Workflow und Softwarewerkzeuge der Methode
(AVL CAMEO, Matlab und IPG CarMaker)

sei auf [13] verwiesen. Zur Beurteilung des Fahrverhaltens wird das On-Center-Manöver herangezogen, [14]. Bild 6 a) zeigt Lenkvorgabe sowie die Fahrzeugreaktion des Manövers. Die objektiven Kriterien sind Handmomente und Steigungen der Lenkradwinkel-Lenkradmoment-Hysterese, siehe Bild 6 b). Um die Anzahl der Parameter möglichst gering zu halten werden die Kennlinien der Lenkfunktionen approximiert. Somit muss nicht jede Stützstelle einer Kennlinie variiert werden sondern nur die Parameter der Approximation. Als Beispiel sei hier die Lenkunterstützung gezeigt, welche sich durch eine quadratische Funktion approximieren lässt, Bild 6 c). Durch eine Variation des Parameters a und anschließender Berechnung der acht Stützstellen wird die Anzahl der Parameter um den Faktor 8 reduziert.
Sobald die Planungsphase abgeschlossen ist, kann mit der Versuchsplanung (DOE) begonnen werden. Hier bietet AVL mit CAMEO ein Werkzeug um den minimal erforderlichen Testumfang bei Einhaltung von Genauigkeitsvorgaben zu finden. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel wird ein D-optimaler Versuchsplan gewählt, welcher zu einem Testumfang von 211 Simulationen führt. Ist der Testumfang definiert, kann mit der Simulation (Simulation) gestartet werden. CAMEO ruft für jeden Testrun Matlab auf und übergibt das entsprechende Parametersetup, Bild 7.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

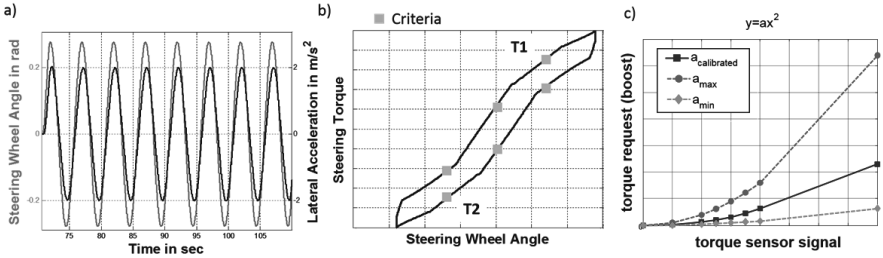


Bild 6: a) On Center Lenkradwinkel (grau) und Querbeschleunigung (schwarz); b) Lenkradwinkel-Lenkradmoment –Hysterese (schwarz) und Berechnungspunkte für die objektiven Kriterien (grau); c) Approximation der Lenkunterstützungskennlinie

In Matlab wird in einem Preprocessing das Parameterfile der vECU manipuliert und die vECU kalibriert. Anschließend ruft Matlab IPG-CarMaker auf und startet die Simulation. Nach Beenden der Simulation berechnet das Postprocessing die objektiven Kriterien und übergibt die Kriterien CAMEO. CAMEO speichert die objektiven Kriterien zum Parametersetup und startet den nächsten Testrun.

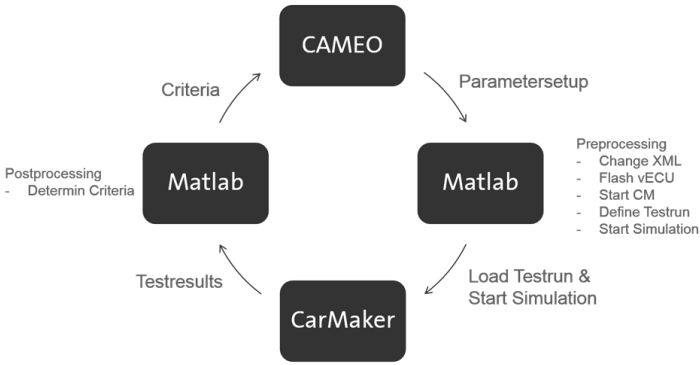


Bild 7: Ablaufdiagramm der Simulatioswerkzeuge

Anschließend werden aus den 211 Parametersetups und entsprechenden objektiven Kriterien Metamodelle aufgebaut. Diese beschreiben den funktionalen Zusammenhang zwischen Parameter und objektivem Kriterium. Die Visualisierung der Metamodelle unterstützt den Ingenieur, um den Einfluss der Parameter auf die objektiven Kriterien zu verstehen, Bild 8. Bild 8 a) zeigt die gute Übereinstimmung des Metamodels T1 mit der CarMaker-Simulation. Das Objektive Kriterium T1 lässt sich somit durch das Metamodell vorhersagen. Im Intersec-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

tionplot sind die Einflüsse der einzelnen Parameter auf das objektive Kriterium dargestellt, Bild 8 b). Parameter 1 und 2 haben nahezu keinen Einfluss während Parameter 3 beide OK (T1 und T2) beeinflusst.

Grundlage der Optimierungsaufgabe bilden die im vorherigen Schritt erzeugten Metamodelle sowie die Zielvorgaben für die objektiven Kriterien. Im Optimierungsschritt (Optimization, siehe Bild 5) wird das Parametersetup gesucht, welches am ehesten die Idealvorgaben aus dem Fahrversuch trifft.

Die Ergebnisse der Optimierung sind in Bild 9 zu sehen, wo die schwarzen Punkte die Paretofront darstellen. Die Paretofront zeigt alle Parametersetups die einen Zustand beschreiben, in dem es nicht möglich ist, eine Zieleigenschaft zu verbessern, ohne zugleich eine andere verschlechtern zu müssen, [15]. Somit ist die Paretofront als Summe der Kompromisslösungen für das Optimierungsproblem zu verstehen. Der Applikateur hat jetzt die Möglichkeit ein Parametersetup auszuwählen, die reale ECU im Fahrzeug mit dem ausgewählten Setup zu kalibrieren und das Lenkverhalten zu beurteilen. Welcher Punkt auf der Paretofront gewählt wird liegt im Ermessen des Applikateurs.

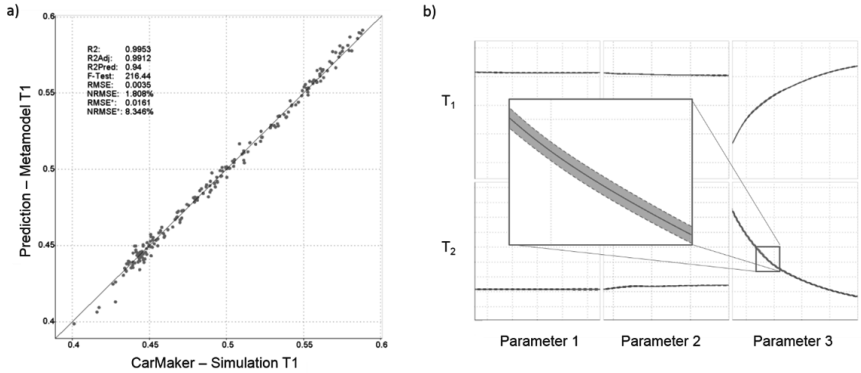


Bild 8: Analyse der Metamodelle mit AVL CAMEO: a) Metamodel vs.CarMaker-Simulation b) Intersection

Um die Optimierungsergebnisse und die Robustheit des Metamodells zu überprüfen, werden gezielt Parametersetups aus der Optimierung ausgewählt. Mit diesen Parametersetups wird die Simulation erneut durchgeführt. Anschließend werden die Simulationsergebnisse mit den Vorhersagen der Metamodelle verglichen. Die Ergebnisse der Validierung sind in Bild 9 b) zu sehen.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

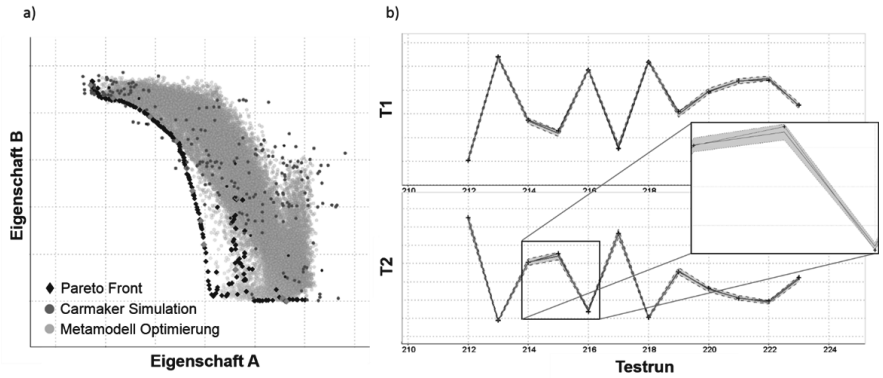


Bild 9: a) Paretofront der Optimierung; b) Ergebnisse der Validierung

Bild 9 b) zeigt das extrapolierte Modell (in rot), dessen Streuband (in grau) und die Validierungspunkte (x). Liegen die Validierungspunkte innerhalb des Streubandes des Metamodells zeigen die Metamodelle eine hinreichende Genauigkeit und dem Optimierungsergebnis kann vertraut werden. Auch die Validierung zeigt, dass Modell T1 und T2 die CarMaker-Simulation gut abbilden.

4. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Methode zur virtuellen Auslegung und Applikation von elektromechanischen Lenkungen vorgestellt. Zunächst wurden die fünf Arbeitsschritte der Methode: Objektivierung, Modellbildung, Erzeugung von Metamodellen, Analyse und Validierung präsentiert. Anschließend konnte die modellbasierte Applikation einer virtuellen ECU gezeigt werden. Hierzu wurde durch statistische Versuchsplanung, Metamodellierung und anschließende Optimierung ein ideales Parametersetup gefunden. Neben der Methodik wurden auch die verwendeten Softwarewerkzeuge vorgestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literaturangaben

[1] Kochem, M. u. Holzmann, H.: Einsatz der Road-Lab-Math Strategie bei der simulationsbasierten Entwicklung von Fahrdynamikregelsystemen (Application of the Road-Lab-Math Strategy in Simulation-based Development of Chassis Control Systems). at – Automatisierungstechnik 55 (2007) 7

[2] Holzmann, H., Hahn, K. M., Webb, J. u. Mies, O.: Simulationsbasierte ESP-Homologation für Pkw. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 114 (2012) 9, S. 698–702

[3] Bauer, M.: Methoden zur modellbasierten Fahrdynamikanalyse und Bewertung von Fahrdynamikregelsystemen. Fortschrittberichte VDI : Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik, Bd. 792. Düsseldorf: VDI-Verl 2015

[4] Bauer, M., Kochem, M. u. Hahn, K. M.: Virtuelle Applikation elektromechanischer Lenkungen. VDI-Tagung AUTOREG 2015 (2015), S. 293–303

[5] Schaffnit, J.: A Master Model Approach for System Simulation using IPG CarMaker. apply& innovate2014. Karlsruhe: IPG Automotive 2014

[6] Schaffnit, J., Holzmann, H., Lauer, J. u. Klemmer, J.: Fahrzeugmodelle effizient und nachhaltig managen. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 119 (2017) 4, S. 42–47

[7] Schick, B., Koegeler, H.-M., Contini, A., Pfeffer, P. E., Lugert, M. u. Schöning, T.: Model-based steering ECU calibration on a steering-in-the-loop test bench. In: Pfeffer, P. (Hrsg.): 6th International Munich Chassis Symposium. Chassis.tech plus. ATZ live. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015, S. 455–466

[8] Wimmer, C., Lehner, M. u. Müller, S.: Model-based engineering process for electric power steering systems. In: Pfeffer, P. E. (Hrsg.): 4nd International Munich Chassis Symposium. Chassis.tech plus. ATZ live. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2013

[9] Schick, B. u. Paulweber, M.: Model-based development methods – What can chassis and powertrain development learn from each other? In: Pfeffer, P. (Hrsg.): 6th International Munich Chassis Symposium. Chassis.tech plus. ATZ live. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015, S. 35–46

[10] Mäder, D.: Simulationsbasierte Grundauslegung der Fahrzeug-Querdynamik unter Berücksichtigung von Erfahrungswissen in der Fahrdynamikentwicklung. Fahrzeugtechnik. Dr. Hut 2012

[11] Wimmer, C.: Modellbasierte Entwicklung elektromechanischer Lenkungen. Fahrzeugtechnik. München: Dr. Hut 2013

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[12] Holzmann, H. u. Hahn, K. M.: Einsatz von HiL-Simulation im Entwicklungsprozess von modernen Fahrwerkregelsystemen am Beispiel Integrated Chassis Control (ICC). VDI-Tagung AUTOREG 2004 (2004)

[13] Pfeffer, P. u. Harrer, M. (Hrsg.): Lenkungshandbuch. Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen. Springer-Lehrbuch. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden 2011

[14] ISO 13674-1: Road vehicles -- Test method for the quantification of on-centre handling. International standard, ISO 13674-1. Geneva, Switzerland: ISO 2010

[15] Wiese, H.: Entscheidungs- und Spieltheorie. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer 2002

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Embedded Control Functions für ein aktives Fahrpedal mit hoher Güte effizient entwickelt

Dipl.-Ing. **Ulrich Bauer**, Dipl.-Ing. **Michael Becker**, Dr.-Ing. **Udo Sieber**, Robert Bosch GmbH, Schwieberdingen

Kurzfassung

Grundlegende Leistungsmerkmale eines Softwareentwicklungsprozesses für ein Embedded Control System liegen zum einen in der erreichbaren Entwicklungsgeschwindigkeit und zum anderen in der erzielbaren Qualität der Funktionsentwicklung. Um beides in dem heute geforderten Maß bei budgetiertem Kosteneinsatz zu erreichen, sind neue Wege unabdingbar. Der hier vorgestellte modellbasierte Ansatz folgt dem Prinzip des Frontloading, d.h. zu einem möglichst frühen Zeitpunkt und ohne den Einsatz aufwändiger Ressourcen einen äußerst hohen Produktreifegrad zu erlangen, obwohl zu diesem Zeitpunkt unter Umständen noch gar keine physikalischen Prototypen oder Serienteile existieren. Diese Thematik soll am Beispiel der Entwicklung eines aktiven Fahrpedals dargestellt werden.

1. Einleitung und Funktionsweise

Zur Regelung der Motorleistung ist ein Fahrpedal im Fahrzeug als Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine unverzichtbar. Früher noch mechanisch direkt über einen Seilzug mit der Drosselklappe verbunden, wird die Gaspedalstellung heute elektronisch an die Motorsteuerung übergeben. In Fahrzeugen findet man grundsätzlich zwei unterschiedliche Bauformen. Das stehende Fahrpedal, dessen Mechanik durch ein Scharnier im Fahrzeugboden befestigt ist, und das hängende Pedal, welches über einen Hebel von oben in den Fußraum reicht. Wesentliches Differenzierungsmerkmal ist neben dem Bauraum auch der Drehpunkt des Hebelmechanismus, so dass sich das Abrollverhalten des Fußes auf dem Pedal grundsätzlich unterscheidet. In Bild 1 ist die hängende Variante des aktiven Gaspedals der Firma Bosch dargestellt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.



Bild 1: Aktives Fahrpedal Bosch (APM3)

Trends wie die Hybridisierung des Antriebsstranges oder auch die Konnektivität im Automobil erfordern neue Konzepte zur Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrer. Ein aktives Fahrpedal vermag bei einem Hybridfahrzeug beispielsweise durch aktive Beeinflussung der Pedalkraftkennlinie das Umschalten zwischen dem rein elektrischen Fahrbetrieb hin zum verbrennungsmotorisch unterstützten Fahren als Kraftschwelle zu erleben. Weiterhin besteht die Möglichkeit in Form eines Pulses oder einer Vibration am Pedal in kritischen Situationen Warnhinweise an den Fahrer zu übermitteln, die als haptische Rückmeldungen vom Fahrer wesentlich schneller wahrgenommen werden können als z.B. akustische oder visuelle Signale (vgl. [1]).

Die Vorrichtung zur Erzeugung der aktiv beeinflussbaren Gegenkraft am Fahrpedal besteht im Wesentlichen aus einem BLDC-Motorantrieb, der in ein Gehäuse, dem sogenannten Lagerbock, integriert wird. Der BLDC-Motor treibt über eine Getriebeeinheit eine Koppelfeder an, die mit dem Fahrpedal aus Sicherheitsgründen nur eine unilaterale formschlüssige Verbindung eingehen kann. Durch definierte Verdrehung dieser Feder im Verbindungsfall wird die gewünschte Kraft-Trajektorie realisiert. So entstehen für das System zwei konkrete Aufgaben: Zum einen muss die Feder der Pedalbewegung stets nachgeführt werden, um Latenzzeiten zu reduzieren, und zum anderen ist es zur Erzeugung definierter Kräfte am Pedal notwendig, eine gewünschte Verdrehung der Feder einzustellen. Beide Aufgaben sind jeweils Positionsregelungen für den BLDC-Antrieb und lassen sich durch Bezug auf das gleiche Federende in nur einer Positionsregelung überlagert realisieren. Für die Ansteuerung des BLDC-Motors kommt ein Rotorlagesensor zum Einsatz mit dessen Hilfe nach einem Ab-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

gleich die elektrische Rotorlage bestimmt werden kann. Dieser Abgleich wird im Onboard-Steuergerät in Form einer Kennlinie mit N Datenpunkten hinterlegt und ist prinzipiell aus [2] bereits als sogenannte Grundadaption bekannt. Der Positions-Regelalgorithmus basiert auf einer 2-Freiheitsgrade-Struktur, bestehend aus einer modellgestützten Vorsteuerung und einem PID-Regler, der unter anderem Störungen durch Bauteiltoleranzen, Umwelteinflüsse oder Alterungseffekte in der Serienanwendung robust ausregelt. Die Grundstruktur des Regelalgorithmus ist in Bild 2 dargestellt, wobei φ_{ref} die Sollposition der Koppelfeder, φ_f die gemessene Ist-Position der Feder und T_{ref} das zu realisierende Drehmoment des BLDC-Motors darstellt.

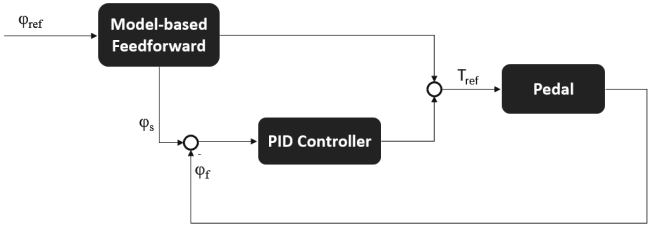


Bild 2: Struktur der Positionsregelung

Basierend auf dem Solldrehmoment des Regelalgorithmus sowie der aktuellen elektrischen Rotorlage werden nun die wirkungsgradoptimalen Steuerspannungen in d/q-Koordinaten durch ein Online-Approximationsverfahren (vgl. Modellbasierte Kommutierung aus [2]) ermittelt. Dabei werden die Steuerspannungen derart gewählt, dass der Energiebedarf für das gewünschte Drehmoment minimal wird. Dies ist der Fall, wenn

$$\min\left(|i|^2 = i_d^2 + i_q^2\right)$$

dargestellt werden kann, wobei i_d und i_q den Stromzeiger im d/q-Koordinatensystem beschreiben. Die Approximation der optimalen Steuerspannungen wird dann über eine inverse Clarke-Park-Transformation mit Hilfe einer B6-Endstufe am System realisiert. Wesentliche Faktoren, die die Genauigkeit der Lageerfassung beeinflussen, sind zum einen Lagetoleranzen der Sensorbauteile, die im vorliegenden Fall zu einer nichtlinearen Sensorkennlinie führen können, und zum anderen die digitale Signalübertragung der Rotorlage, die eine Latenzzeit zur Folge hat und bei hohen Beschleunigungen und hohen Geschwindigkeiten nicht mehr vernachlässigt werden darf. Um diese Signallaufzeit zu kompensieren, kommt bei dem vorliegenden System ein Kalman Filter basierend auf einem Ein-Massen-Modell zum Einsatz

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

(vgl. [2]), welches die aktuelle Federposition und damit auch die Rotorlage rekonstruiert. Die Softwarestruktur ist in Bild 3 dargestellt.

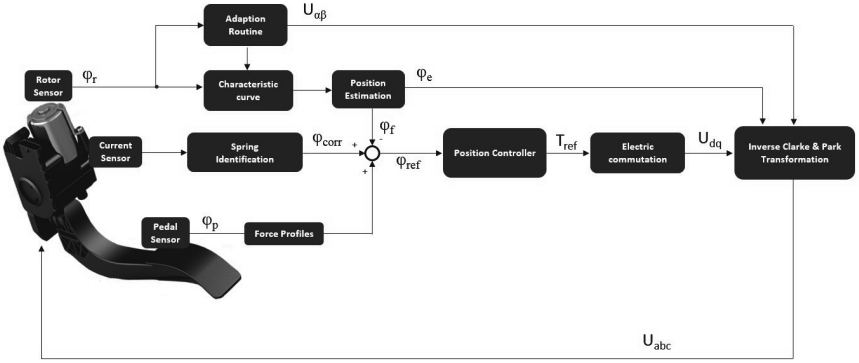


Bild 3: Software-Strukturdiagramm aktives Gaspedal

Mit den Größen

φ_r	Gemessene Rotorposition
φ_p	Gemessene Pedalposition
φ_{corr}	Korrekturwinkel
φ_f	Koppelfederposition
φ_{ref}	Zu realisierende Soll-Trajektorie
φ_e	Elektrische Rotorlage
T_{ref}	Zu realisierendes Soll-Drehmoment
$U_{\alpha\beta}$	Zu realisierende Steuerspannung in α/β-Koordinaten
U_{dq}	Zu realisierende Steuerspannung in d/q-Koordinaten
U_{abc}	Reale Steuerspannungen in den 3 Phasen des BLDC-Motors

Viele Teile der implementierten Software basieren auf physikalischen Modellen deren optimale Funktionsweise erheblich von der Genauigkeit und der Varianz der verwendeten Modellparameter abhängen. Im Serieneinsatz unterliegen Motor-, Getriebe- aber auch Sensoreigenschaften natürlichen Streuungen bedingt durch Toleranzen der Fertigung oder durch den Zusammenbau von verschiedenen Teilen. Grundsätzlich muss gewährleistet sein, dass trotz möglicher Parameterschwankungen eine robuste Funktionsweise der jeweiligen Softwarekomponenten sichergestellt ist. Um den Betrieb stets innerhalb der Kundenspezifikation

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

zu garantieren, werden üblicherweise sowohl zeit- als auch kostenintensive Komponententests mit realen Grenzmustern unternommen. Im Fokus dieser Tests stehen meist jedoch Fragestellungen bezogen auf die Ermüdung bzw. das Lebensdauerverhalten der Hardwarekomponenten. Eine Möglichkeit zur Erfassung und Analyse der Robustheit von Softwarefunktionen wie z.B. Adaptions- und Regler-Algorithmen für den Serieneinsatz bietet hier ebenso ein modellbasierter Ansatz. Dadurch lassen sich konkrete Aussagen über die Auswirkungen der Serienstreuung oder weiterer Störeinflüsse auf das Gesamtsystem finden.

Für den Robustheitsnachweis der betreffenden Software liegt der Fokus im ersten Schritt auf der Entwicklung eines möglichst detaillierten Streckenmodells für die Simulationsumgebung. Grundgedanke dabei ist die Aufnahme aller möglichen Effekte, die durch toleranzbehaftete Serienfertigung im Feld auftreten und sich nachvollziehbar auf das Gesamtsystem auswirken. Je detaillierter das System im Simulationsmodell abgebildet wird, desto breiter kann die Robustheitsanalyse erfolgen und desto geringer fällt letztlich das Risiko für eine Fehlfunktion des Systems im Feld aus.

Nachfolgend soll am Beispiel der Lagetoleranzen des Rotorlagegebers sowie des Übertragungsverhaltens der Pedalmechanik dargestellt werden, wie detailliert im vorliegenden Fall in der Simulationsumgebung modelliert wurde.

2. Co-Simulation und Modellbildung

Während die Software in SIMULINK implementiert wurde, kommt für die Modellierung des Streckenmodells AMESim als Co-Simulationstool zum Einsatz. Auf Grund der Einfachheit der Darstellung und Übersichtlichkeit eignet sich das Werkzeug hervorragend für diese Aufgabenstellung. Werden für Rapid-Prototyping und Co-Simulation dieselben Schnittstellen gewählt, so ist ein einfacher Austausch beider Systeme im Testprozess möglich (vgl. Bild 4).

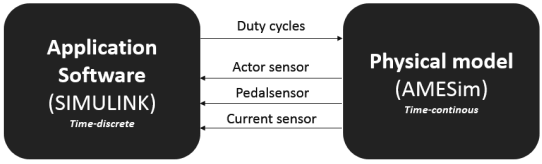


Bild 4: Schnittstelle zwischen Softwaremodell und Co-Simulation

Um die wesentlichen physikalischen Einflussgrößen auf das Gesamtsystem darzustellen,

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

wurden in der Simulationsumgebung die in Bild 5 dargestellten Komponenten detailliert nachgebildet. In den Fällen, in denen der Modellierungsaufwand überschaubar war, wurde der Fokus auf eine physikalische Modellierung gelegt. Ausnahmen stellen hierbei das kennfeldbasierte Modell des Rotor-Magnetfeldes sowie das Meta-Modell der Gehäusesteifigkeit dar (vgl. Bild 5), wobei letztere Eigenschaft aus der Annahme einer Serienschaltung von Koppelfeder und Gehäuse hervorgeht und basierend auf realen Messdaten der Gesamtsystemsteifigkeit und der Koppelfedersteifigkeit abgeleitet wurde.

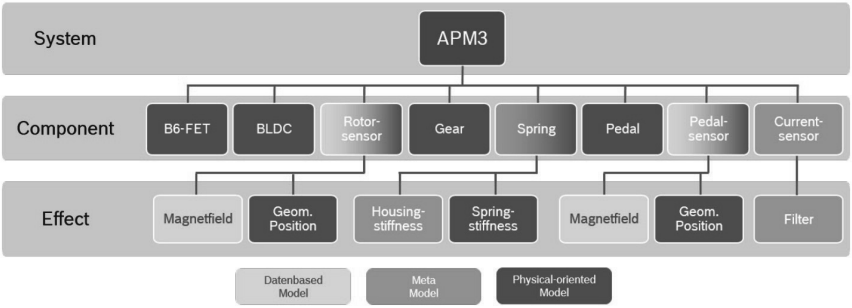


Bild 5: Modellübersicht aktives Fahrpedal

Ein besonderes Augenmerk wurde im vorliegenden Modell auf die möglichst reale Abbildung der Lagetoleranzen des Rotorlagegebers gelegt. Die in Serie auftretenden Toleranzen müssen in der Simulation berücksichtigt werden, um Aussagen über die Genauigkeit der Kommutierung des BLDC-Motors und über die Robustheit des Regelalgorithmus zu treffen. Die Rotorlageerfassung erfolgt hierbei durch einen auf der Rotorwelle platzierten Permanentmagneten, dessen Magnetfeldstärke in geringer Entfernung zum Magneten durch einen Hall-Sensor erfasst wird. Für das Rotorlagemodell wird eine Kombination aus Kennfeld und geometrischen Zusammenhängen gewählt, wobei das Kennfeld aus einer statischen dreidimensionalen Magnetfeldsimulation um den Magneten resultiert. Über die geometrische Position der relevanten Hall-Elemente relativ zum Magneten kann dann über eine Transformationsmatrix auf die entsprechenden Magnetfeldkomponenten geschlossen werden. So können veränderliche relative Positionen des Sensor-ASIC untersucht werden, wobei in dieser Betrachtung externe Einflüsse auf das Magnetfeld vernachlässigt werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Eine erste statische Toleranzbetrachtung ist in Bild 6 nachfolgend dargestellt und zeigt prinzipiell den maximalen Positionsfehler abhängig von Verschiebung oder Verkippung des ASICs.

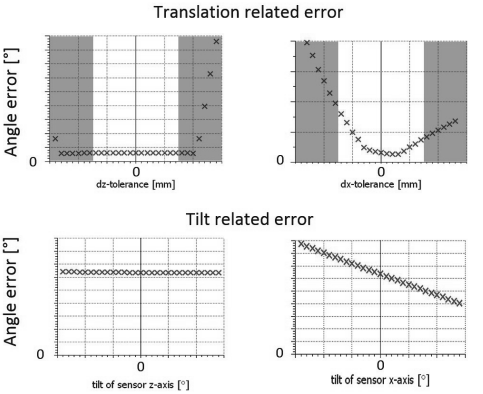


Bild 6: Sensitivität bezogen auf Verschiebung und Verkippung des Sensor-ASICs

Nachfolgende Bild 7 zeigt den prinzipiellen Vergleich des Simulationsmodells der Koppelfeder mit den realen Messdaten, wobei ersichtlich ist, dass sich Temperatur-schwankungen eher in geringem Maße auf das Verhalten dieser Teilkomponente auswirken und daher im Modell nicht weiter berücksichtigt werden.

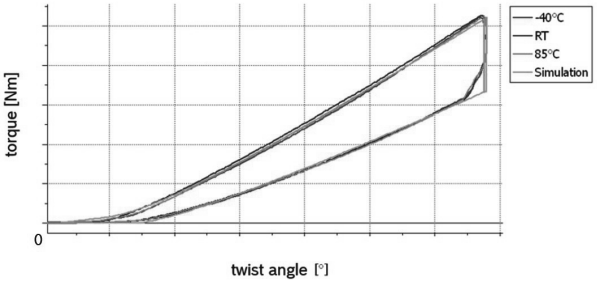


Bild 7: Vergleich zwischen Federmodell und Messdaten

Eine wichtige Rolle bei der Kraftübertragung spielt ebenfalls die Pedalmechanik inklusive Pedallagerung und passiver Rückstellfeder bis die zu realisierende Gegenkraft am Fahrerfuß spürbar wird. Das Gesamt-Fahrpedalmodell konnte letztlich mit realen Messdaten abgegli-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

chen werden, wobei Bild 8 zeigt, dass für das verwendete Testprofil eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Realität sichergestellt ist.

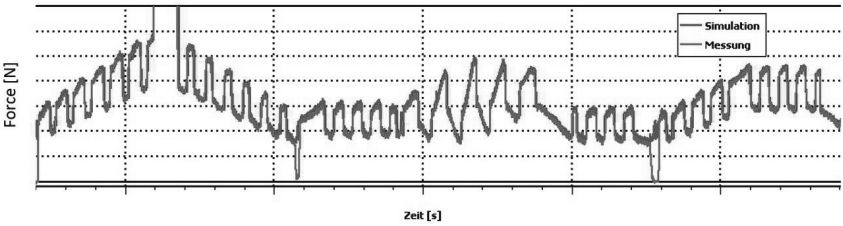


Bild 8: Vergleich Pedalkraft Messung vs. Simulation

Wie mit den genannten Punkten gezeigt werden konnte, beinhaltet die Simulationsumgebung ein hoch genaues Modell der zu regelnden Strecke, die von einer Vielzahl von Parametern abhängt. Die wesentlichen Eigenschaften des Systems konzentrieren sich dabei auf etwa 45 Parameter, die für weitere Untersuchungen in Betracht gezogen werden können und mit denen die Auswirkungen von Serienstreuung auf die Robustheit der Software im weiteren Verlauf der Arbeit näher untersucht werden sollen.

3. Modellbasierter Robustheitsnachweis

Da es sich beim aktiven Fahrpedal um eine neuartige Komponente handelt, bei der die genannten Regleralgorithmen, Adaptionsroutinen sowie auch das Kommutierungsverfahren erstmalig in dieser Kombination zum Einsatz kommen, liegt für ihre Feldanwendung keine Erfahrung vor. Um das Risiko einer Fehlfunktion im Feld möglichst zu minimieren, wird nachfolgend die Methode der modellbasierten Robustheitsanalyse angewandt, nach der mit Hilfe eines hoch genauen Simulationsmodells durch Parametervariation verschiedenste Softwarefunktionalitäten auf ihre Robustheit hin überprüft werden und das Systemverhalten speziell auch für Grenzmuster analysiert wird. So kann in kürzester Zeit ein enormer Erfahrungsschatz über die neue Komponente gewonnen werden.

In allgemeiner Form kann das Vorgehensmodell, wie in Bild 9 gezeigt, dargestellt werden.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

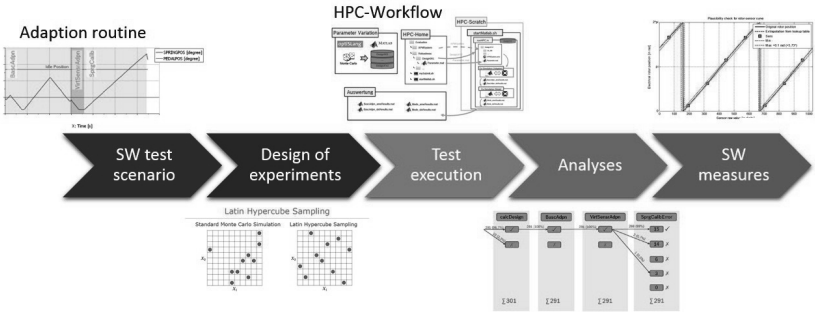


Bild 9: Vorgehensmodell modellbasierte Robustheitsanalyse

Die einzelnen Schritte lassen sich wie folgt beschreiben:

1. Definition des Testszenarios z.B. Band-Ende-Adaptionsroutinen
2. Design of Experiments: Festlegen eines Parametersets, welches die relevanten Einflüsse der Fertigungstoleranzen widerspiegelt
3. Test Simulation auf dem Robert Bosch high performance computing cluster (HPC)
4. Analyse der Simulationsdaten unter Berücksichtigung geeigneter Kennzahlen
5. Ableitung notwendiger Softwaremaßnahmen zur Verbesserung der Robustheit der Software

Grundlegendes Ziel bei der Auslegung der zu untersuchenden Stichprobe ist es, eine möglichst vertrauenswürdige Verteilung zu generieren, die den denkbaren Parameterraum möglichst vollständig abdeckt, jedoch überschaubar bleibt, um den Simulationsaufwand so gering wie möglich zu halten. Wie bereits in [3] dargestellt, eignet sich ein „Latin-Hypercube"-Sampling besser als ein Monte-Carlo-Ansatz, um einen geeigneten Grenzmusterdatensatz zu generieren, da durch das Latin-Hypercube-Verfahren der Parameterraum bei gleicher Stichprobengröße sehr viel gleichmäßiger besetzt werden kann. Erste Analysen zeigten, dass eine Stichprobengröße von 300 Variationen ausreicht, um bei überschaubarem Simulationsaufwand den notwendigen Informationsgewinn über die sensitiven Einfluss-größen zu erlangen und den Robustheitsnachweis für eine große Streubreite innerhalb der betrachteten Parameter zu erbringen.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Im Folgenden soll am Beispiel der Band-Ende-Adaptionsfunktionen die Analysemöglichkeiten erläutert werden, die im vorliegenden Fall zum Einsatz kamen, ohne genau auf deren Funktion Bezug zu nehmen, da in dieser Arbeit keine funktionalen oder konstruktiven Aspekte sondern das methodische Vorgehen im Fokus steht. Entsprechend werden im weiteren Verlauf physikalische Eigenschaften und Zusammenhänge verallgemeinert. Im ersten Testdurchlauf wurde das Verhalten der entwickelten Funktionssoftware mit Hilfe der Stichprobe bestehend aus einem nominalen Muster und 300 Grenzmusterdatensätzen getestet. Bild 10 zeigt dabei das Ergebnis des ersten Testdurchlaufs.

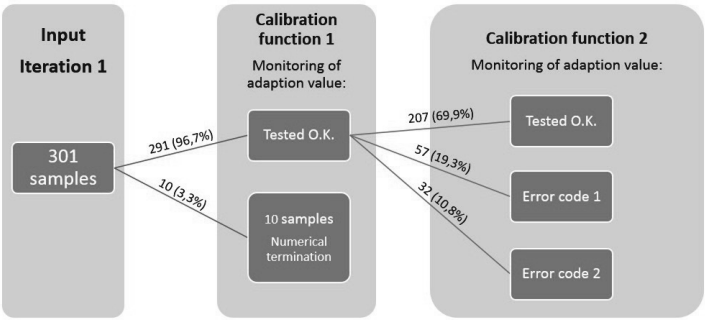


Bild 10: Analyse der Ergebnisse der Adaptionsfunktionen mit Hilfe einer Monitoringfunktion bzw. basierend auf Kennzahlen

Bei 10 Datensätzen konnte die Simulation auf Grund von numerischen Problemen nicht vollständig durchgeführt werden, so dass dadurch eine Ausschussquote von ca. 3,3% zustande kommt. Durch Auswertung des Adaptionswertes nach Durchführung der Adaptionsroutine 1 konnte festgestellt werden, dass alle noch verbleibenden 291 Datensätze keine unerwarteten Ergebnisse liefern. Die interne Diagnosemöglichkeit der Adaptionsroutine 2 unterstützt weiterhin die Auswertung, wobei 207 Muster korrekt adaptiert wurden, während bei 57 bzw. 32 unterschiedlichen Grenzmusterdatensätzen die jeweiligen adaptierten Werte außerhalb des ursprünglichen Erwartungshorizontes lagen und der jeweilige Fehlercode gesetzt wird. Bild 11 zeigt beispielsweise die Verteilung eines bestimmten Adaptionswertes über die durchgeführten Simulationen.

Durch entsprechende Auslegung dieses Erwartungshorizontes auf den gesamten zu erwartenden Toleranzbereich besteht nun die Möglichkeit am Band-Ende gezielt Grenzmuster herauszufiltern, deren Performance nicht den internen Qualitätsvorgaben der Firma Bosch

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

genügt.

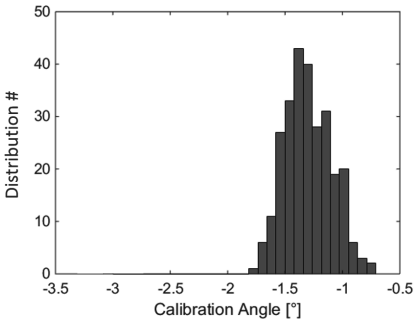


Bild 11: Verteilung des Adaptionswertes

So wird deutlich, dass durch diese Voruntersuchung der Applikationsaufwand deutlich reduziert werden kann, da bereits vorab sehr viele Kombinationen von Parametern analysiert und entsprechende Softwaremaßnahmen ergriffen werden können.

Durch weitere Analyse der Simulationsdaten kann außerdem untersucht werden, von welchen Parametern die adaptierten Werte aus der Adaptionsroutine 1 und 2 weitestgehend beeinflusst werden. Dazu wird der Adaptionswert in Abhängigkeit des jeweiligen Parameters betrachtet, wobei dieser Zusammenhang beispielhaft in Bild 12 dargestellt ist.

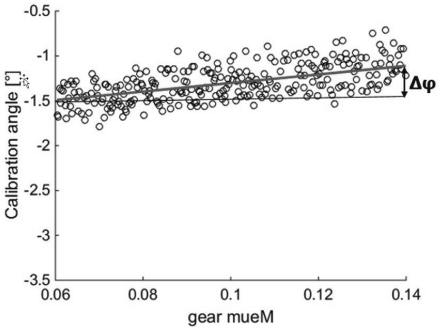


Bild 12: Sensitivität der Getriebereibung auf einen Adaptionswert

Am Beispiel der Getriebereibung kann hier der Einfluss der Serienstreuung auf den Adaptionswert verdeutlicht werden. Je größer der Parameter für die Reibung im Getriebe ausfällt,

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

desto größer ist auch der Adaptionswert. Dieses Vorgehen kann weiterhin für alle variierten Parameter angewandt werden und es zeigt sich, dass der Adaptionswert besonders stark von zwei Parametern wesentlich beeinflusst wird, während die weiteren Parameter eher eine untergeordnete Rolle spielen (vgl. Bild 13).

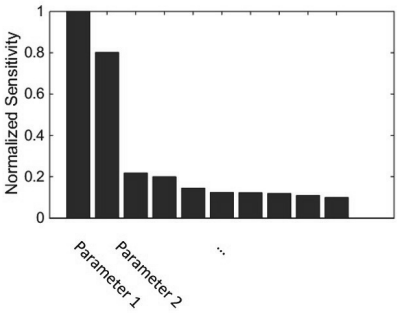


Bild 13: Genormte Sensitivität der Haupteinflussgrößen

In gleichem Maße erfolgte die Analyse des Reglers, um die Auswirkung der Positionsregelung auf die Kraftrückmeldung am Fahrerfuß zu überprüfen. Zudem konnte auch hier gezeigt werden, welche toleranzbehafteten Größen sich mehr oder weniger stark auf eine fehlerhafte Kraftrückmeldung auswirken.

4. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein System zur haptischen Kraftrückmeldung am Gaspedal des Fahrzeugs vorgestellt. Speziell wurde dabei die Struktur der Positionsregelung als Zwei-Freiheitsgrad-Regelung sowie das Zusammenwirken der Regelung mit weiteren Adaptionsroutinen in allgemeiner Form dargelegt. Weiterhin wurde ein Überblick über das Simulationsmodell mit einzelnen Beispielen (Rotorlagesensor, Koppelfeder) gegeben, wobei auf die Co-Simulation mit dem Tool AMESim eingegangen wurde. Abschließend konnte der Ansatz der modellbasierten Robustheitsanalyse vorgestellt werden mit dessen Hilfe die Robustheit der entwickelten Software hinsichtlich der Serienstreuung getestet wurde. Mit diesem Ansatz konnte gezeigt werden, dass trotz beschränkter Entwicklungsressourcen die Qualität in der Funktionsentwicklung bezogen auf den Serieneinsatz frühzeitig durch die erweiterte Betrachtung der Serienstreuung verbessert werden kann. Gleichzeitig ergibt sich durch die reduzierten Aufwendungen für Musterteile speziell bei Neuentwicklungen ein Wettbewerbsvorteil hinsichtlich der erzielbaren Entwicklungsgeschwindigkeit.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

4. Literaturangaben

[1] Lange, C., et al.: Sicherheitspotential und Verbrauchsreduzierung durch ein intelligent geregeltes aktives Fahrpedal, TU München, 2009

[2] Dierolf, S.: Drosselklappenverstelleinrichtung mit bürstenlosem Antrieb, VDI Wissensforum, Düsseldorf, 2015

[3] Will, J., Bucher, C.: Statistische Maße für rechnerische Robustheitsbewertungen, Proceedings Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage, 2006

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783161022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Entwicklung eines Regelungskonzeptes für einen selbstfahrenden Fahrsimulator

Development of a control concept for a wheeled mobile driving simulator

Zhongyi Gong, M.Sc. M.Sc., Prof. Dr.-Ing. **Ulrich Konigorski**,
Technische Universität Darmstadt, Institut für Automatisierungstechnik und Mechatronik,Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird der Entwurf eines Regelungskonzeptes für einen selbstfahrenden Fahrsimulator vorgestellt. Eine hierarchische Regelungsstruktur ist dabei in das Gesamtkonzept eingebettet. Zunächst werden die Beschleunigungsverläufe des Fahrzeuges mittels modellprädiktiver Motion Cueing Strategie in zulässige Trajektorien des Simulators transformiert. Dann stabilisiert die Trajektorienfolgeregelung mittels differential-geometrischer Methodik die generierten Trajektorien von der oberen Regelungsebene. Daraus kann eine realitätsnahe Wiedergabe von Fahrmanövern resultieren. Das Gesamtkonzept wird experimentell an einem Versuchstand erprobt.

Abstract

This contribution presents the design of an overall control concept for a wheeled mobile driving simulator. A hierarchical control structure is embedded in the overall concept. The vehicle accelerations are initially transformed into the admissible trajectories by model predictive motion cueing strategy. Then, the trajectory tracking controller based on differential geometric methods stabilizes the generated trajectories from the upper control level. A more realistic motion reproduction can therefore obtained by this approach. The overall control concept is tested at a test stand.

1. Einleitung

Fahrsimulatoren sind ein etabliertes Entwicklungswerkzeug in der Automobilindustrie. Durch den gezielten Einsatz von Fahrsimulatoren können sowohl objektive als auch subjektive Bewertungen eines Gesamtfahrzeuges oder einzelner Regelsysteme z.B. Fahrassistenz-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

systeme zur Erzielung einer hohen Anforderung an Sicherheit in einer Prüfstandsumgebung unter definierten und reproduzierbaren Randbedingung durchgeführt werden. Außerdem können die Funktionalitäten solcher neuartigen Fahrdynamikregelsysteme und Fahrwerkskomponenten in frühen Phasen des Entwicklungsstadiums untersucht werden, bevor die Prototypen im realen Fahrversuch getestet werden. Dies spart Entwicklungszeit und Kosten. Das heißt, dass das Testkonzept mittels Fahrsimulatoren eine Schließung der Lücke zwischen Model-in-the-loop Simulation und realen Fahrversuchen realisiert [1]. Darüber hinaus wird die Integration des Fahrers in den Entwicklungsprozess im Sinne eines kompletten Regelkreis ‘Fahrer - Fahrzeug - Umwelt‘ ermöglicht.

Aufgrund von mechanischen und räumlichen Beschränkungen können konventionelle Fahrsimulatoren die typischen Stadtfahrszenarien wie Anhalten, Abbiegen und Wenden nur begrenzt simulieren. Ein möglicher Ausweg sind selbstfahrende Fahrsimulatoren. Die physikalische Machbarkeit und die Systemgrenzen eines selbstfahrenden Fahrsimulators wurden in den letzten Jahren wissenschaftlich untersucht [2]. Allerdings wurde eine detaillierte Untersuchung des selbstfahrenden Fahrsimulators aus regelungstechnischer Sicht bisher nicht vorgenommen und hiermit beschäftigt sich nun dieser Beitrag. Es wird ein modellbasierter Ansatz zum Reglerentwurf für einen selbstfahrenden Fahrsimulator vorgestellt, siehe Bild 1. Dieser wurde am Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik (RTM) an der TU Darmstadt aufgebaut und besteht aus einer omnidirektionalen Plattform und einer kadanischen Aufhängung.



Bild 1: Aufbau des RTM-Fahrsimulators. CAD Konstruktion (links) und Hardware Prototype (rechts)

2. Modellierung

Die detaillierte Modellierung der Dynamik dieses Fahrsimulators wurde bereits in einigen Veröffentlichung, z.B. [3], [4] vorgestellt. Hier wird daher nur kurz auf die für die Systemanalyse und den Reglerentwurf wesentlichen Aspekte eingegangen.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Horizontaldynamik

Die Horizontaldynamik des Fahrsimulators beschreibt das dynamische Verhalten in der horizontalen Ebene und enthält drei Freiheitsgrade, die durch Längs- und Quergeschwindigkeit sowie Gierrate des Schwerpunktes des Simulators im mitbewegten Koordinatensystemen beschrieben werden. Die Kraftbilanz in Längs- und Querrichtung und das Momentengleichgewicht um die Z-Achse ergeben folgende Gleichung:

$$\dot{x}_\mathrm{h} = f_\mathrm{h}(x_\mathrm{h}) + f_\mathrm{T}(x_\mathrm{T}, u_\mathrm{T}) + B_\mathrm{h} u_\mathrm{h}, \quad x_\mathrm{h} = \begin{bmatrix} v_x & v_y & \dot{\psi} \end{bmatrix}^\mathrm{T} \qquad (1)$$
$$y_h = x_\mathrm{h}$$

mit $u_\mathrm{h} = P_\mathrm{h} F_\mathrm{t}$, $F_\mathrm{t} = P_\mathrm{h}^{-1} u_\mathrm{h}$. P_h ist eine reguläre 3x3 Matrix. Die 3x3 Matrix B_h beschreibt die Trägheitsmatrix. u_h stellt die resultierenden Reifenkräfte bzw. Momente aus einzelnen Reifenkräften F_t auf den Schwerpunkt. Wichtig ist, dass die resultierenden Reifenkräfte u_h für die Modellierung des Gesamtsystems als fiktive Eingänge interpretiert werden können und somit das Gesamtmodell mittels differentialgeometrischer Methode systematisch analysiert werden kann.

Raddynamik und Reifenmodell

Im Unterschied zu anderen selbstfahrenden Fahrsimulatoren mit angetriebenen und lenkbaren Rädern besitzt jedes Rad des RTM Fahrsimulators nur einen Freiheitsgrad mit der rotatorischen Bewegung um die y-Achse des Radkoordinatensystems. Mit dem Radträgheitsmoment und dem dynamischen Radradius lauten die Bewegungsgleichungen der Rotationsdynamik der Räder in Zustandsraumdarstellung

$$\dot{x}_\mathrm{t} = A_\mathrm{t} x_\mathrm{t} + B_\mathrm{t} u_\mathrm{t} + N_\mathrm{t} P_\mathrm{h}^{-1} u_\mathrm{h}, \qquad x_\mathrm{t} = \begin{bmatrix} \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 \end{bmatrix}^\mathrm{T},\ u_\mathrm{t} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \end{bmatrix}^\mathrm{T} \qquad (2)$$
$$y_t = \mathrm{x}_t$$

wobei u_t den Antriebsmomenten entspricht, welche durch die Elektromotoren generiert werden. Die Zustandsgrößen x_t sind die einzelnen Raddrehzahlen. Die Matrizen $A_\mathrm{t}, B_\mathrm{t}, N_\mathrm{t}$ sind entsprechend gewählt. Zur Berechnung der Reifenkraft aus dem Radschlupf, der Radlast und dem Haftbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn lässt sich ein bekanntes Reifenmodell, Magic Tyre Formula aus [5] darstellen, welches analytisch invertierbar ist. Die Schlupffunktion in Längsrichtung wird durch die Gleichung

$$s_i = \frac{r_{dyn}\omega_i - v_{txi}}{\left\| v_{txi} \right\|}, \qquad i = 1,2,3, \qquad (3)$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

definiert. Mit Hilfe des Schlupfs und der Radlast lassen sich die Reifenkräfte durch die Gleichung

$$F_{ti} = F_{\max i} \sin\left(C_i \arctan\left(\frac{B_i}{\mu_i} \|s_i\| \right) \right) \frac{s_i}{\|s_i\|}, \qquad i=1,2,3. \tag{6}$$
$$F_{\max i} = \mu_i F_{zi}$$

beschreiben. Es ist anzumerken, dass der vorgestellte Fahrsimulator aufgrund der mechanischen Anordnung des Rades keine Querkräfte generieren kann.

Kardanische Aufhängung

Statt einer Stewartsplattform wird hier eine kardanische Aufhängung mit zwei Freiheitsgraden zur Neigung der Plattform als Beschleunigungsdarstellung verwendet. Unter gewisser Vereinfachung kann das Gesamtsystem für die inneren und äußeren Zylindern als zwei unabhängige lineare Systeme

$$\dot{x}_\mathrm{T} = A_\mathrm{T} x_\mathrm{T} + B_\mathrm{T} u_\mathrm{T} \qquad x_\mathrm{t} = \left[\theta_\alpha \;\; \theta_\beta \;\; \dot{\theta}_\alpha \;\; \dot{\theta}_\beta \right]^\mathrm{T}, \; u_\mathrm{t} = \left[M_\alpha \;\; M_\beta \right]^\mathrm{T} \tag{7}$$
$$y_\mathrm{T} = \mathrm{C}_\mathrm{T} x_\mathrm{T}$$

beschrieben werden.

Gesamtmodell

Für einen integrierten Reglerentwurf wird ein Gesamtmodel erstellt. Durch die Zusammenfassung aller Teilsysteme ergibt sich ein semi-explizites Deskriptorsystem,

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ 0 &= q(x,u) \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{8}$$

mit dem Zustandsvektor $x = \left[x_\mathrm{h}^\mathrm{T} \quad x_\mathrm{t}^\mathrm{T} \quad x_\mathrm{T}^\mathrm{T} \right]^\mathrm{T}$ und dem Steuervektor $u = \left[u_\mathrm{h}^\mathrm{T} \quad u_\mathrm{t}^\mathrm{T} \quad u_\mathrm{T}^\mathrm{T} \right]^\mathrm{T}$

wobei die Reifenkräfte als Zwangsbedingungen betrachtet werden.

3. Systemanalyse und Reglerentwurf

Durch Untersuchung der Differenzordnungen aller Teilsysteme liegt das dynamische Verhalten des Gesamtsystems unter Vernachlässigung der Zwangsbedingungen in Steuerungsnormalform vor, welche schon in [4] nachgewiesen wurde. Daher erhält man die Beziehung

$$y^{(\delta)} = A(x) + B(x)u \tag{9}$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

durch Ableiten des Ausgangs mittels Lie-Ableitung bis die Eingänge in den Gleichung explizit aufgetauchen, wobei $y^{(\delta)} = \left[y_1^{(\delta_1)} \quad y_2^{(\delta_2)} \quad \dots \quad y_8^{(\delta_8)} \right]^{\mathrm{T}}$ die höchsten Ableitungen δ_i des Ausganges y_i und δ_i den relativen Grad der einzelnen Teilsysteme beschreiben. Die Zustandsrückführung

$$u = B^{-1}(x)(-A(x) + v) \tag{10}$$

kompensiert die Nichtlinearität und realisiert eine Ein-/Ausgang Entkoppelung, wenn die Entkopplungsmatrix $B(x)$ regulär ist. Daraus resultieren die entkoppelten Teilsysteme

$$y_i^{(\delta_i)} = v_i \tag{11}$$

$i = 1,\dots,8.$ Eine Folgeregelung in Form von

$$v = y_d^{(\delta)} + Q_{\delta-1} e^{(\delta-1)} + \dots + Q_1 \dot{e} + Q_0 e \tag{12}$$

wird so entworfen, dass der Folgefehler $e = y_d - y$ durch eine geeignete Wahl der Matrix Q_i stabilisiert wird. Es sei erwähnt, dass sich alle Systemvariablen durch die entsprechenden Ausgänge und deren bestimmten Ableitungen darstellen lassen. Dies beschreibt eine inhärente Eigenschaft des RTM Fahrsimulators. Es ist anzumerken, dass die Trajektorien mit Hilfe der Zwangsbedingungen gelöst werden müssen, d.h. es gilt

$$0 = q(y_d^{(r)}, y_d^{(r-1)}, \dots, y_d). \tag{13}$$

4. Motion Cueing Strategie

Um das Verhalten eines Fahrzeuges mit einer Bewegungsplattform mit translatorischen und rotatorischen Freiheitsgraden zu simulieren, spielt die Motion Cueing Strategie eine wichtige Rolle. Unter *Motion Cueing* versteht man im vorliegenden Beitrag, dass ein vestibulärer Reiz, z.B. Beschleunigung, durch das Gleichgewichtsorgan wahrgenommen wird. Dieser wird durch eine Bewegung des Fahrsimulators ausgelöst. Die Algorithmen zur Berechnung der Steuersignale für die Bewegungsplattform werden als *Motion Cueing Algorithmen* bzw. *Motion Cueing Strategie* bezeichnet.

Um Fahrzeugbewegungen durch ein Bewegungssystem mit begrenztem Arbeitsraum für den Menschen realitätsgetreu nachbilden zu können, wird das Verfahren der *Tilt Coordination* verwendet. Durch Ausnutzung der Eigenschaft des menschlichen Gleichgewichtsorganes kann eine Beschleunigung auch durch Kippen der Simulatorplattform dargestellt werden. Das Gleichgewichtsorgan unterscheidet nicht zwischen einer Neigung des Körpers und einer translatorischen Beschleunigung, wenn die Neigungsrate unterhalb eines Schwellenwertes liegt. Daher wird das Prinzip des sogenannten *Washout* angewendet, um die Fahrzeugbe-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

wegung in einem begrenzten Arbeitsraum abbilden zu können. Durch das „Aus-waschen“ der auftretenden Beschleunigungssignale wird die Simulatorplattform wieder in den Mittelpunkt gebracht, vom dem aus der größte Bewegungsraum zu Verfügung steht [6].

Für die Anwendung eines Fahrsimulators gilt es eine große Anzahl von Limitierungen und Randbedingungen zu beachten, damit den Probanden ein realitätsnahes Fahrgefühl vorgegeben werden kann. Dies sind z.B. Limitierung der Drehraten für die Tilt Coordination, Limitierung der maximalen rotatorischen Bewegung für das Neigungssystem, Limitierung des Arbeitsraums, Stellgrößenbeschränkungen usw. Solche Limitierungen sollten in der Anwendung des Fahrsimulators berücksichtigt werden, welche eine Herausforderung bei Entwurf der Motion Cueing Strategie darstellt. Die verbreiteten *Klassischen Motion Cueing Algorithmen* werden basierend auf Tief-/Hochpassfilter entwickelt. Die vom Fahrzeugmodell berechnete Beschleunigung wird zuerst in verschiedene Frequenzbänder aufgeteilt. Dann werden solche Motion Cues durch einen Schlitten oder Hexapod ausgeführt. Der Vorteil liegt in der einfachen Struktur. Allerdings besteht der wesentliche Nachteil darin, dass die Filterparameter sehr schwer einstellbar sind, um alle Limitierungen einzuhalten. Daher können unbefriedigende Ergebnisse zur Wiedergabe der Beschleunigung entstehen. In den letzten Jahren wurde ein neuer Ansatz zum modellbasierten Entwurf der Motion Cueing Algorithmen eingeführt [7]. Das Verfahren basiert auf einer Methode der modellprädiktiven Regelung, welche ein dynamisches Optimierungsproblems auf einem bewegten Horizont löst und alle Beschränkungen explizit in der Optimierung berücksichtigt. Aufgrund der Ein-/Ausgangs-Linearisierung steht die Gleichung (11) als Systemmodell für die modellprädiktive Regelung zu Verfügung. Der zu regelnde Ausgang bzw. die spezifische Kraft in Bezug auf Kopfkoordinate ergibt sich durch eine kinematische Beziehung

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = T_e^h \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + T_e^h \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = T_\beta^h \left(T_v^h \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\theta}_\beta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \dot{\theta}_\alpha \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{14}$$

wobei die Matrizen T_e^h, T_β^h, T_v^h die entsprechenden Transformationsmatrizen sind. In dieser Arbeit werden nur die Komponenten $\tilde{y} = \left[f_x, f_y \right]^\mathrm{T}$ als Ausgang betrachtet. Daher wird das Optimierungsproblem wie folgt formuliert:

$$\begin{aligned} \min \qquad J_c = {} & x_M^T(k+N) Q_N x_M(k+N) + \sum_{i=1}^{N-1} e_y^T(k+i) Q_y e_y(k+i) + \\ & x_M^T(k+i) Q_x x_M(k+i) + u_M^T(k+i) Q_u u_M(k+i), \end{aligned} \tag{15}$$

Die Modellgleichung für das geregelte Gesamtsystem ergibt sich zu:

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \tag{16}$$

Die zusätzlichen Ungleichungen unter den Nebenbedingungen für die Zustandsgrößen und Steuergrößen lassen sich wie folgt formulieren:

$$\begin{aligned} \underline{x} \le x(k+i) \le \overline{x}, \\ \underline{u} \le u(k+i) \le \overline{u}, \end{aligned} \tag{17}$$

$i = 1,...,N$, mit dem Folgefehler $e_y = \tilde{y} - a_v$. a_v stellt die Beschleunigungsverläufe bzw. Gierrate des Fahrzeuges dar. Es ist anzumerken, dass das geregelte Gesamtsystem (16) bezüglich der Regelgröße $\tilde{y}$ eine instabile bzw. grenzstabile interne Dynamik aufweist. Daher werden die Matrizen Q_N, Q_y gezielt so gewählt, dass die Stabilität des geschlossenen Regelkreises sichergestellt werden kann.

5. Gesamtkonzept

Eine modular-hierarchische Regelungsstruktur für den RTM selbstfahrenden Fahrsimulator ist schematisch in Bild 3 dargestellt. Eine solche Struktur biete Transparenz sowohl bei der modellbasierten Auslegung und Optimierung als auch bei einer späteren Inbetriebnahme.

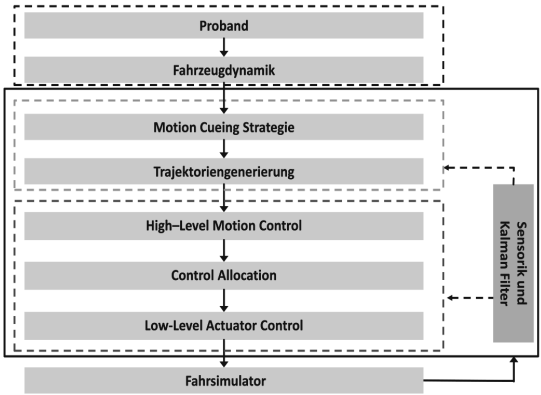


Bild 3: Gesamtkonzept der hierarchischen Regelungsstruktur

Der strukturelle Aufbau wird im Folgenden erläutert. Zunächst wird eine Interpretation der Eingaben des Probanden durchgeführt, welcher die gewünschten Fahrzeugbewegungen bzw. Beschleunigungsverläufe anhand der zu simulierenden Fahrzeugdynamik generiert. Abschließend berechnet die modellprädiktive Motion Cueing Strategie die zugehörigen trans-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

latorischen und rotatorischen Bewegungen zur Reproduktion eines realitätsnahen Fahreindrucks. Dazu muss zuerst die Zulässigkeit der Bewegungen aus dem Sicherheitsgründen geprüft werden. Schließlich müssen die aus der letzten Steuerungs-ebene generierten Sollverläufe für die einzelnen Aktoren über eine unterlagerte Steuerung und Regelung dynamisch umgesetzt werden. Hierzu lassen sich zunächst für die gewünschten Bewegungen des Fahrsimulators die erforderlichen resultierenden Momenten und Kräfte berechnen. Danach gilt es, die aus der Regelungsstrategie berechneten Radkräfte in Stelleingriffe an den einzelnen Rädern in Form der Drehzahl umzurechnen. Die Zustandsgrößen und wesentlichen Modellparameter des Fahrsimulators können mit Hilfe von Sensorfusion geschätzt werden.

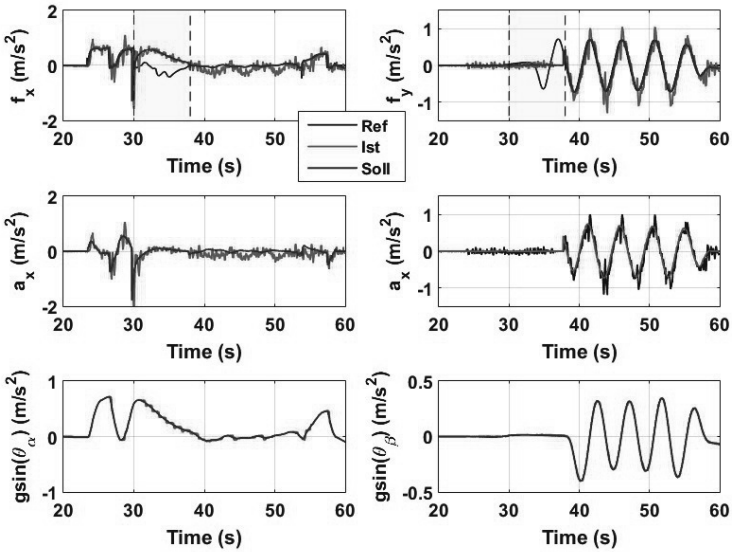


Bild 4: Messergebnisse am Versuchstand des RTM Fahrsimulators

6. Experimentelle Ergebnisse

Im Folgenden werden die Messergebnisse eines Experimentes am Versuchstand zur Bewertung dieses entworfenen Regelungskonzeptes präsentiert. Ein fahrdynamisch relevanter Fahrversuch, z.B. ein 18-Meter-Slalom wird hier zur Validierung des entworfenen Regelungskonzeptes eingesetzt, welcher hauptsächlich aus Bremsung, Beschleunigung und

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Ausweichmanöver besteht. Die Beschleunigungsdaten werden durch die Fahrdynamiksimulation Software IPG CarMaker aufbereitet. Die Messergebnisse der 18-Meter-Slalom Testfahrt ist im Bild 4 gezeigt. Die Beschleunigungssignale der Fahrzeugbewegung werden als Referenzdaten angesehen. Die rote Linie steht für die Messdaten, während die aus der modellpräktiven Motion Cueing Strategie generierten Sollwerte für den Fahrsimulator in Blau dargestellt sind. Die spezifischen Kräfte f_x, f_y werden durch die Motion Cueing Strategie in zwei Teile aufgeteilt. Es ist ersichtlich, dass die Beschleunigungen der Plattform a_x, a_y und die fiktiven Beschleunigungen aus der Tilt Coordination $g\sin(\theta_\alpha), g\sin(\theta_\beta)$ durch die integrierte Fahrdynamikregelung sehr gut ausgeregelt werden. Wie oben erwähnt, besteht die Motion Cueing Strategie aus zwei Phasen, der Folge-Phase und dem Washout. Im Zeitraum von 30s bis 38 s wird die Washout-Strategie aktiviert, um eine Überschreitung des Arbeitsraumes zu vermeiden. Daher ist die Nachbildung der Beschleunigungsverläufe in diesem Zeitraum aus Sicherheitsgründen verletzt. Zusammenfassend kann das vorgestellte Regelungskonzept die Aufgaben der Fahrsimulation sehr gut erfüllen und einfach in der Praxis realisiert werden.

7. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine modular hierarchische Regelungsstruktur auf Basis eines modellbasierten Verfahrens für einen selbstfahrenden Fahrsimulator entwickelt. Die Zielsetzung dabei war, die Beschleunigungsverläufe des zu simulierenden Fahrzeuges möglichst realitätsnahe wiedergeben zu können. Zur Realisierung dieser Zielsetzung werden zwei verschiedene Regelungsansätze vorgestellt. Der Ansatz der vollständigen Entkoppelung basiert auf der Systemdynamik des RTM Fahrsimulators und bedient sich differentialgeometrischer Methoden. Daraus ergibt sich eine integrierte Trajektorienfolgeregelung mittels differentialgeometrischer Methodik. Zusätzlich können die Zwangsbedingungen mittels differentieller Parameterierungen berücksichtigt werden. Weiterhin wird eine modellprädiktive Motion Cueing Strategie zur Trajektoriengenerierung vorgestellt, welche auf der Lösung eines beschränkten Optimierungsproblems basiert. Die Funktionsfähigkeit und Güte des vorgeschlagenen Regelungskonzeptes werden experimentell an einem Prüfstand gezeigt.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Literaturhinweise:

[1] G. Baumann, W. Krantz, U. Reuter und J. Strecker**:** Bewertung von Lenkgefühl und Fahrverhalten im Stuttgarter Fahrsimulator, 5th International Munich Chassis Symposium, München 2014, S. 201-215.

[2] Alexander Betz: Feasibility Analysis and Design of Wheeled Mobile Driving Simulators for Urban Traffic Simulation, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2015.

[3] Zhongyi Gong und Ulrich Konigorski: Model-based Control of a Wheeled Mobile Driving Simulator, Driving Simulation Conference, Paris 2016, S. 21-29.

[4] Zhongyi Gong und Ulrich Konigorski: Modeling and Control of a Wheeled Mobile Driving Simulator by Differential Parameterizations, American Control Conference 2017.

[5] Ralf Orend: Integrierte Fahrdynamikregelung mit Einzelnradaktorik, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2006.

[6] Martin Fischer: Motion-Cueing-Algorithmen für eine realitätsnahe Bewegungssimulation, Dissertation, DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik, 2009.

[7] M. Dagdelen, G. Reymond, A. Kemeny, M. Bordier and N. Maizi: Model-based predictive motion cueing strategy for vehicle driving simulators, Control Engineering Practice, 17, 2009, 995-1003

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Networked Driving Simulation for Future Autonomous and Cooperative Vehicle Systems

Development of a Modular Platform for Networked Driving Simulation Based on High-Level Architecture

M.Eng. **Kareem Abdelgawad**, M.Sc. **Sven Henning**,
M.Sc. **Patrick Biemelt**, Dr.-Ing. **Sandra Gausemeier**,
Prof. Dr.-Ing. **Ansgar Trächtler**,
Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn

Abstract

In networked driving simulation, two or more human drivers interact in a common virtual environment and form a much closer approximation of real-world traffic with its unpredictability. This paper presents the structure of a modular platform for networked driving simulation based on the IEEE standard High-level architecture (HLA). The platform serves as a virtual prototyping tool for development, test, and training purposes with respect to future autonomous and connected vehicle systems. Two driving simulators, a traffic simulator, a data logger, and a central station represent the primary components of the developed platform. A simulation model of an autonomous driving system was utilized and a group of test persons was involved to show the usability and validity of the developed platform.

Kurzfassung

Vernetzte Fahrsimulation bietet eine realitätsgetreuere Nachbildung des realen Straßenverkehrs und seiner eingeschränkten Prädizierbarkeit. Dieser Beitrag stellt die Struktur einer modularen Plattform für vernetzte Fahrsimulation auf Basis des IEEE Standards High-Level Architecture (HLA) vor. Die Plattform dient als Werkzeug für das virtuelle Prototyping für zukünftige autonome und vernetzte Fahrzeugsysteme. Zwei Fahrsimulatoren, ein Verkehrssimulator, ein Datenlogger und eine zentrale Station repräsentieren die Hauptkomponenten der entwickelten Plattform. Zur Validierung wurde ein Simulationsmodell für das autonome Fahren entwickelt und in die Simulationsumgebung der beteiligten Fahrsimulatoren integriert. Außerdem wurden die Bedienbarkeit und die Akzeptanz der aufgebauten Plattform für vernetzte Fahrsimulation anhand von Probandenversuchen geprüft.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

1. Introduction

Driving simulators are utilized in a variety of applications, such as development of vehicle systems, training and demonstration, and studying behavior and performance of drivers. It is feasible and less expensive to build and operate simulations in a controlled environment than conducting real field drives. Various traffic scenarios that involve a human-driven vehicle and programmed traffic participants can be created to match the requirements of different applications. Environmental effects can be reproduced easily, like, e.g., foggy or snowy roads, night-time driving conditions, etc. Vehicle dynamics and power train characteristics, like, e.g., steering and braking, can be altered to represent different vehicles. On the other hand, driving simulators present an inherently safe environment for research and development. There are no hazards to the driver or other traffic participants while undergoing critical driving conditions or testing new vehicle systems. Fig. 1 shows the different variants of driving simulators at the University of Paderborn.



Fig. 1: Driving simulators with different complexity grades at the University of Paderborn

Nonetheless, conventional driving simulation provides only a rough representation of the unpredictability level encountered when multiple human drivers interact in the same real traffic environment. It lacks realism and multi-interactivity tightly associated with future automotive applications. Different vehicle systems, such as advanced driver assistance systems (ADAS), are becoming more complex and interconnected. Hence, it is necessary to build corresponding complex and interactive simulation environments.

Creating a virtual driving environment simultaneously accessed by two or more human drivers allows a much closer approximation of real-world traffic interactions. With networked driving simulation, typical applications of driving simulation can be extended to consider multi-driver scenarios [1]. Assistance systems that are based on communication between vehicles can be developed and tested in complex and interactive scenarios [2]. Driver's training can be extended to multi-driver training, where a driving instructor handles several drivers at the same time in a realistic traffic environment [3]. Studying drivers' performance and behavior can deliver substantial results, if drivers don't react only to programmed traffic participants, but also interact with other human-driven vehicles.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

However, with myriad choices for available simulator components, networked simulation architectures, and communication systems, users of networked divining simulators are confronted typically with high system complexity. To tackle this challenge, this paper presents the structure of a modular platform for networked driving simulation. The structure follows one of the promising standard architectures for distributed simulation. Due to platform modularity, adding or removing system components can be carried out with minimum effort. The complexity of the participating driving simulators as well as some communication characteristics can be altered to match different application requirements.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2 shows some of the reviewed related work for networked driving simulation in the research and commercial fields. Section 3 presents the structure and system components of the developed platform. Usability validation for the developed platform and its results are provided in Section 4. Finally, Section 5 discusses the future work.

2. Related work

Networked driving simulation has attracted great attention of researchers. Several studies have made use of networked driving simulators to consider diverse research questions, which mainly address interaction between human drivers. For example, one approach for a multi-driver simulation is described in [4]. The system is used to study the effects of cooperative ADAS on drivers' subjective feelings, such as driving excitement. Up to five persons can drive simultaneously in the same virtual environment. The network of this platform consists of 25 personal computers connected via gigabit Ethernet. A study to investigate the differences in driving behaviors during changing lanes is presented in [5]. The work used a networked simulation framework based on the SIGVerse simulator environment. The cooperative behavior of drivers under different situational conditions, like, e.g., availability of lanes, was investigated in [6]. The study used the multi-driver simulation environment MoSAIC, where three driving simulators are integrated into the same framework. Another study on a multi-user driving simulation environment is presented in [7]. Four low-cost connected driving simulators were used to test how voice-based command systems, such as GPS-based assistance systems, influence the driving behavior at intersections. Investigations on collision-likely driving conditions are presented in [8]. The studies were performed on drivers, who meet each other in a situation that has a strong potential for a collision. The work used a simulation platform that utilizes two adjacent full-vehicle simulators sharing a common virtual world. Two linked driving simulators were used in [9] to analyze interactions at intersections. While one of the drivers was a normal participant, the other driver was instructed to adapt his

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

driving behavior to this participant in order to form a safety-critical situation. A study for anger and bother experience while driving with traffic light assistant is presented in [10]. The work used the multi-driving simulation environment at WIVW GmbH, where four drivers can participate in the same virtual environment. Investigation of Intelligent Transportation Systems using driving simulators is presented in [11]. The work used multiple-seat driving simulation platform, in which several human drivers interact in the same virtual environment. The platform consists of three fixed-base networked training simulators with real vehicle mock-ups. Another platform composed of two simple fixed-based driving simulators and an integrated traffic simulator has been introduced in [12]. The system is used to conduct experiments for drivers' behavior in realistic traffic environments. A simple environment of multi-driving simulators is presented in [13]. The setup consists of several simple PC-based driving simulators, where 3ds Max and Virtools modeling software were used to build the virtual driving scenes. It is used to conduct experiments on dynamic speed guidance strategies, like, e.g., green wave speed and eco-driving speed guidance strategies.

In addition to the reviewed studies, which addressed multi-driving simulation environments, there are several commercial or ready-to-use solutions in the market to build facilities for networked driving simulation. For example, COCODRIS from Liophant Simulation is a training station based on real-time cooperative driving simulation [14]. The software simulates vehicles and handling equipment in networked multi-operator environments. SCANeR DT from OKTAL is a software suite with modules specifically designed for drivers' training purposes in general and session supervision in a multi-simulator environment in particular. PatrolSim from L-3 DPA is a solution for coordinated-response training for law enforcement agencies and emergency vehicle operators. Different driving simulators can be connected in an interactive and realistic environment for training purposes.

On the other hand, there are different architectures available for networked simulation, like, e.g., Common Object Request Broker Architecture (CORBA) [15], Test and Training Enabling Architecture (TENA) [16], Common Training Instrumentation Architecture (CTIA) [17], Distributed Interactive Simulation (DIS) [18], and High-level Architecture (HLA) [19]. Each of these architectures has pros and cons; they provide different capabilities and functions for networked simulation. HLA and DIS have gained wide acceptance and popularity; they lead the other common architectures for distributed simulation [20].

Despite promising work in the research and commercial fields, utilizing standard architectures for distributed simulation was generally not considered for networked driving simulation. Almost all work for networked driving simulation found in literature preferred not to follow these architectures to avoid cost and/or complexity. However, the utilization of such architec-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

tures has considerable benefits with respect to simulation management. That is, they allow for straightforward integration and assured interoperability of existing simulators [23]. Thereby, handling or modifying an environment of networked simulators can be carried out with less effort and cost. In particular, HLA was developed with the motivation of establishing a universal standard that covers all possible management needs and scenarios in a distributed simulation environment. One of the strengths of HLA among other architectures is its generality. The provided services of HLA enable the construction of modular, flexible, and well-defined environments of distributed simulation. As state of the art for networked simulation, HLA standard was chosen in this work in particular. The following section presents the concept, structure, and system components of the developed platform for networked driving simulation based on the IEEE HLA standard.

3. Concept and structure

The platform for networked driving simulation developed in this work is intended to serve various future applications of driving simulators. Hence, modularity was a key requirement for the design, where each system component is responsible for a separate concern. Fig. 2 shows the structure of the developed platform.

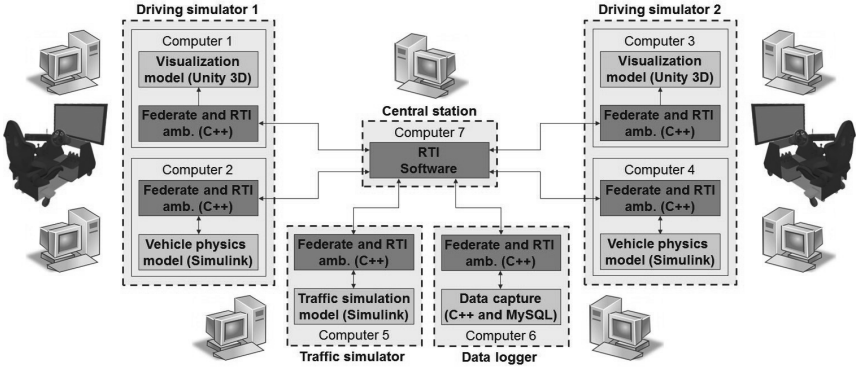


Fig. 2: Structure of the developed platform for networked driving simulation

The core setup involves two driving simulators that can interact within the same virtual environment. However, additional driving simulators can be integrated if the capabilities of the utilized communication system endure the added network load. The platform is composed mainly of seven computers and the topology follows the IEEE HLA standard. As basic

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

knowledge of HLA concepts is assumed, a comprehensive discussion of its terminology, rules, and services is not provided in this work.

Two computers for each participating driving simulator carry out the interactive driving simulation tasks. While one computer of each participating driving simulator performs the 3D visualization task, vehicle dynamics is simulated on the other computer. A fifth computer is responsible for simulating programmed traffic participants. Capturing, saving, and replaying simulation data are carried out by a sixth computer. The whole platform is managed by a seventh computer representing a central station. Fig. 3 shows the two networked driving simulators of the developed platform.



Fig. 3: The developed platform for networked driving simulation

The following sub-sections discuss the idea and main development concept of each system component. More detailed information about the underlying implementation aspects is provided in the corresponding references.

3.1. Central station

The central station is a console that is composed of one computer. System operator can control all aspects of the simulation session. With respect to the HLA standard, the runtime infrastructure software (RTI) runs on this computer [21]. It provides a set of functions and services necessary to manage the operation of the platform, i.e., the HLA federation, and the data exchange between system components, i.e., the HLA federates. The Portico software is utilized for HLA services and functions in this work; it is an open source and cross-platform RTI implementation [22]. Portico follows a decentralized RTI approach, where a part of the RTI implementation resides at each system component side. As shown in Fig. 2, the system

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

is composed of six federates. Within each federate, two local standard RTI components implemented in C++ represent the necessary interface with the programs of system components: federate ambassador and RTI ambassador. The federate ambassador contains a set of functions that are called by the RTI software. Moreover, the federates receive data objects through this federate ambassador. The RTI ambassador makes calls to the RTI software. Similarly, the federates send data objects through this RTI ambassador. Through publish-subscribe models within the RTI ambassadors, programs of system components declare the data objects that they can generate and those that they want to receive. The internal communication between the RTI components and the programs of system components happens through a User Datagram Protocol (UDP).

Position and orientation states of each simulator vehicle and traffic participant represent the primary data that must be exchanged. However, other information can be exchanged to achieve better visualization fidelity, like, e.g., front and rear lamps state, turning indicator lamps state, front wheels orientation, and wheels rotation speed.

As a communication system between system components, Ethernet 1 Gb/s is utilized initially due to its availability, administration simplicity, and sufficient bandwidth. For applications with real-time requirements, other communication systems can be considered. However, this may result in tradeoffs with respect to the different communication characteristics. Moreover, the compatibility with HLA standard must be investigated. The UDP is used for the transport layer of the OSI model [23]. It provides a connectionless transmission with minimum network overhead. However, if reliable data delivery or error correction capabilities are needed, the Transmission Control Protocol (TCP) can be utilized. Detailed guidelines for the appropriate selection of communication systems and protocols are beyond the scope of this work.

3.2. Utilized driving simulators

Two existing PC-based driving simulators without motion platform were utilized within the developed platform for networked driving simulation [24]. Each driving simulator involves two computers. One computer has an instance of a visualization model implemented with Unity3D; a development engine that provides rich and easy functionalities for creating interactive 3D environments. The visualization model enables the use of head-mounted displays to provide a surround 3D-viewing and deliver user-dependent scenes for more immersion. Together with the associated local RTI component (C++ interface), the visualization model instance of each participating driving simulator forms a federate that communicates with the RTI software. It receives the position and orientation of the corresponding simulator vehicle as well as those of other participating simulator vehicles. Moreover, it receives the position and ori-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

entation of the programmed traffic participants. The other computer has a vehicle physics model, which consists of various real-time capable sub-models developed with MATLAB/Simulink, such as horizontal and vertical dynamics, steering, braking, engine, differential, tires, and wheels. Moreover, the vehicle physics model incorporates a sub-model for interactive simulation of ADAS. This consists of further sub-models: sensors model, controller module, and decision unit. Interactive simulation for emergency brake assistant and emergency steer assistant was developed and presented in a previous work [25]. However, the general design of the controller module and decision unit makes it convenient to develop and plug in new ADAS functions. A simulation model for an autonomous driving system has been implemented and used to validate the developed platform for networked driving simulation. More detailed information about the implementation of the vehicle physics model and the ADAS simulation sub-model is provided in [25]. The vehicle physics model of each participating driving simulator and the associated local RTI component (C++ interface) form a federate that communicates with the RTI software. It sends its position and orientation and receives those of the other participating simulator vehicles and programmed traffic participants.

3.3. Central traffic simulator

Although two or more human drivers can interact within the same virtual environment, simulating programmed traffic participants is still essential. To achieve more complex traffic scenarios, a central traffic simulator was developed using MATLAB/Simulink in a previous work [26]. As simulating traffic several miles ahead or behind a simulator vehicle is not necessary, this central traffic simulator generates traffic with realistic interactions only in the neighborhood of the participating simulator vehicles. Moreover, the speed and density of the generated traffic can be varied during simulation runtime as desired [26].

The central traffic simulator and its local RTI component (C++ interface) form a federate that communicates with the RTI software. It sends the position and orientation of each programmed traffic participant and receives those of all participating driving simulators.

3.4. Simulation data logger

The data logger is used for capturing, saving, and replaying simulation data. Using an intuitive GUI, system operator can record messages to a file and replay them for easy analysis and after-action review. The data logger was implemented with the QT C++ library and the relational database management system MySQL.

Together with the associated local RTI component (C++ interface), the simulation data logger forms a federate that communicates with the RTI software. It receives the position and orien-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

tation of the driving simulators and the programmed traffic participants. The following section presents a usability validation for the developed platform for networked driving simulation.

4. Usability validation

Twenty test persons have participated in the subjective usability validation process of the developed platform for networked driving simulation. The group included test persons of different ages, gender, and levels of experience with driving simulation. Each pair of test persons had to perform two driving rounds. Moreover, the test persons were instructed to switch between the autonomous and manual driving modes. Directly after each driving round, the test persons had to rate the overall experience with networked driving simulation using three qualitative levels: bad, middle, and good. The ratings for the first driving rounds were generally worse than those of the subsequent rounds. This can be related to the lack of concentration of unexperienced test persons as they were unfamiliar with the driving control elements. Moreover, driving in a race-like experiment challenged the test persons at the beginning and distracted them from the proper control of the vehicle. However, the subsequent driving rounds showed better acceptance, where the test persons interacted in a more realistic way close to that of driving in real traffic environments. The behavioral validation process showed that the test persons could reasonably handle the warnings and indications of the autonomous driving system with very good learning curves. Furthermore, the test persons did not report boredom typically experienced with conventional driving simulation. They showed interest to experience prototypes of connected vehicle systems using the developed platform for networked driving simulation. The following section refers to the future work in this regard.

5. Future work

With respect to driving simulation in general, guidelines for users to select or build driving simulators that fit their application requirements have been addressed in the literature [27]. Moreover, a concept to build a reconfigurable driving simulation environment has been developed within a previous research project [28]. However, when it comes to networked driving simulation, users are confronted with higher system complexity. The new perspectives of driving simulation applications and their quickly changing requirements represent a clear impediment to progress in this area. With various off-the-shelf simulator components and communication systems, users usually determine system requirements based on their own understanding of component capabilities. The available budget dominates typically while determining the required complexity level of system components. This results in tight configurations, which can consider specific applications while misestimating their requirements.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Hence, a method for application-oriented networked driving simulation will be developed in the next steps. This method will consider the requirements of different application scenarios for networked driving simulation and present guidelines to build suitable configurations flexibly. That is, users will be able to determine the fidelity of the participating simulators, the appropriate networked simulation architectures, as well as the suitable communication systems according to the application scenarios without deep technical investigations of available solutions.

Literature:

[1] Fisher, D., Rizzo, M., Caird, J., Lee, J.: Driving Simulation for Engineering, Medicine and Psychology. Florida USA: CRC Press, Taylor & Francis Group 2011

[2] Lu, N., Cheng, N., Zhang, N., Shen, X., Mark, J.: Connected Vehicles: Solutions and Challenges. IEEE Journal of Internet of Things, Volume 1, Issue 4, 2014, p. 289-299

[3] Kandhai, K., Smith, M., Kanneh, A.: Immersive driving simulation for driver education and analysis. 16th IEEE International Conference on Computer Games, Louisville USA 2011

[4] Maag, C., Muhlbacher, D., Mark, C., Kruger, H.: Studying effects of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) on individual and group level using multidriver simulation, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. Volume 4(3), 2012, p. 45-54

[5] Bando, T., Shibata, T.: Networked driving simulator based on SIGVerse and lane-change analysis according to frequency of driving. 15th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, Alaska USA 2012

[6] Heesen, M., Baumann, M., Kelsch, J., Nause, D., Friedrich, M.: Investigation of Cooperative Driving Behaviour during Lane Change in a Multi-Driver Simulation Environment. Human Factors and Ergonomics Society Conference, Toulouse France 2012

[7] Yasar, H., Berbers, Y., Preuveneers, D.: A computational analysis of driving variations on distributed multiuser driving simulators. IASTED International Conference on Modelling and Simulation, Quebec Canada 2008

[8] Hancock, P., de Ridder, S.: Behavioural accident avoidance science: understanding response in collision incipient conditions. Journal of Ergonomics, Volume 46, No. 12, 2003, p. 1111-1135

[9] Houtenbos, M.: Expecting the unexpected: a study of interactive driving behaviour at intersections, TU Delft Diss 2008

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[10] Rittger, L., Mühlbacher, D., Maag, C., Kiesel, A.: Anger and bother experience when driving with a traffic light assistant: A multi-driver simulator study. Annual Conference of Human Factors and Ergonomics Society, Lisbon Portugal 2014.

[11] Sawyer, B., Hancock, P.: Development of a Linked Simulation Network to Evaluate Intelligent Transportation System Vehicle to Vehicle Solutions. 56th Annual Meeting of Human Factors and Ergonomics Society, USA 2012

[12] Ma, T., Li, T.: A multi-driver simulator studyDevelopment and application of an integrated traffic simulationand multi-driving simulators. Journal of Simulation Modelling Practice and Theory, Volume 59, 2015, p. 1-17

[13] Niu, D., Sun, J.: Eco-Driving Versus Green Wave Speed Guidance for Signalized Highway Traffic: A Multi-Vehicle Driving Simulator Study. Journal of Social and Behavioral Sciences, Volume 96, 2013, p. 1079-1090

[14] Dias, L., Pereira, G., Vik, P., Oliveira, J.: Discrete Simulation Tools Ranking– a Commercial Software Packages comparison based on popularity. Industrial Simulation Conference, Venice Italy 2011

[15] Chapin, S., Herndon, W., Notargiacomo, L., Katz, M., Mowbray, T.: Security for the Common Object Request Broker Architecture (CORBA). 10th Annual Conference on Computer Security Applications, Florida USA 1994

[16] Noseworthy, J.R.: Developing distributed applications rapidly and reliably using the TENA middleware. IEEE Conference on Military Communications Conference, Atlantic city USA, 2005

[17] Lanman, J. T., Linos, P. K., Employing Service Orientation to Enable Training as a Service in the U.S. Army. IEEE International Conference on Cloud Engineering, California USA, 2013

[18] Cavitt, D.B., Overstreet, C.M., Maly, K.J.: A Performance Monitoring Application For Distributed Interactive Simulations (DIS). Winter Simulation Conference, Atlanta USA 1997

[19] Wenguang, W., Yongpinq, X., Xin, C., Qun, L., Weiping, W.: High level architecture evolved modular federation object model. Journal of Systems Engineering and Electronics, Volume 20, Issue 3, 2009, p. 625-635

[20] Henninger, A., Richbourg, B., Lutz, R., Saunders, R., Loper, M.: The Live Virtual Constructive (LVC) Architecture Roadmap: Foundations from the Past and Windows to the Future. Conference of Interservice/Industry Training, Simulation, and Education, Florida USA 2010

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

[21] Huang, J., Hao, J., Zhao, X., Jianxing, G.: Basic Study on RTI Interoperability. 2nd International Conference on Computer Modeling and Simulation, Sanya China 2010

[22] Nouman, A., Anagnostou, A., Taylor, S.: Developing a Distributed Agent-Based and DES Simulation Using poRTIco and Repast. 17th IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, Delft Netherlands 2013

[23] Orzen, S.: Interaction understanding in the OSI model functionality of networks with case studies. 9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timisoara Romania 2014

[24] Abdelgawad, K., Abdelkarim, M., Hassan, B., Grafe, M., Gräßler, I.: A modular architecture of a PC-based driving simulator for advanced driver assistance systems development. 15th IEEE International Workshop on Research and Education in Mechatronics, El-Guna Egypt 2014

[25] Abdelgawad, K., Hassan, B., Berssenbrügge, J., Stöcklein, J., Grafe, M.: A Modular Architecture of an Interactive Simulation and Training Environment for Advanced Driver Assistance Systems. International Journal On Advances in Software IARIA, Volume 8, 2015, p. 247-261

[26] Abdelgawad, K., Henning, S., Biemelt, P., Gausemeier, S., Trächtler, A.: Advanced Traffic Simulation Framework for Networked Driving Simulators. 8th IFAC Conference on Advances in Automotive Control, Sweden 2016

[27] Negele, J.: Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung, TU München Diss. 2007

[28] Hassan, B.: A Design Framework for Developing a Reconfigurable Driving Simulator, University of Paderborn Diss. 2013

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Numerical Modelling of the Human Driver for lateral closed-loop steering maneuvers

M.Sc. **Pratiksh Bolia**, Prof. Dr.-Ing. **Steffen Müller**,
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Kraftfahrzeuge,
Institut für Land- und Seeverkehr, Berlin

1. Introduction

The steering system represents a human-machine interface between the driver and the vehicle. In order to increase human drivers' acceptance of the autonomous steering controller and assistance in steering task, it is important to understand the human driver steering behavior in the first place. As a result, it is important to model the steering controllers in a human-like way so as to mimic the human steering task. This paper is organized as follows. Firstly, a vehicle lateral state space model is derived in road coordinate state space. With the help of derived state space model, a brief overview of three different vehicle lateral trajectory feedback controller (TGC) models used in this work is given and subsequently their performance is evaluated on real time EPS HIL test bench for different driving maneuvers. In order to evaluate the characteristics of the human driver steering operation, single lane change (SLC) tests were conducted on EPS HIL test bench with the fixed base driving simulator and the transient parameters of the driver model were identified. Based on the experimental results a model based driver feedback lateral trajectory control is derived for relevant driver parameters. With the help of estimated model parameters, the ideal lateral trajectory feedback controller (TGC) is characterized to produce different driving behaviors on test bench. Finally conclusions and recommendations for future work are given.

2. Lateral Trajectory Controller

In this section, a driver lateral trajectory path following controller is derived which is needed to follow the desired path as planned by the trajectory planning module. To facilitate the analysis and synthesis of lateral vehicle trajectory control law, the equation of motion of a plane single track model is considered in this paper. Figure 1 shows the single track model with important vehicle attributes. The general vehicle planar linear lateral motion dynamics in vehicle coordinate system $(X_V\ Y_V)$ is expressed in vehicle reference frame written as follows.

$$\dot{V}_y = -\frac{(C_f + C_r)}{mV_x} V_y + \left(-V_x + \frac{(C_r l_r - C_f l_f)}{mV_x}\right) \dot{\psi} + \frac{C_f}{m} \delta_f \qquad (1)$$

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

$$\ddot{\psi} = \frac{(C_r l_r - C_f l_f)}{J_z V_x} - \frac{\left(C_r {l_r}^2 + C_f {l_f}^2\right)}{J_z V_x}\dot{\psi} + \frac{C_f l_f}{J_z}\delta_f + \frac{1}{J_z}\Delta M_{zz}$$

In linear state space form equation (1) can be written as follows, here, ′A′ being the system matrix, ′B′ being the control matrix and ′E′ being the disturbance matrix.

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_y \\ \ddot{\psi}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_y \\ \dot{\psi}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}b_{11} \\ b_{21}\end{bmatrix}\delta_f + \begin{bmatrix}e_{11} \\ e_{21}\end{bmatrix}\Delta M_{zz}\,, \quad \dot{x} = A\,x + Bu + Ed \qquad (2)$$

The state vector ′x′ here is the vehicle lateral states in terms of $x = \begin{bmatrix}V_y & \dot{\psi}\end{bmatrix}^T$ and ′u′ is the control vector which is front wheel steering angle and ′d′ here is the disturbance yaw moment ′ΔM_{zz}′ due to longitudinal and lateral tire forces due to external factors. To derive the path following control steering angle, the vehicle lateral motion is transformed and derived in terms of lateral displacement error ′Δy′ and yaw angle error ′$\Delta\psi = (\psi_{ref} - (\beta + \psi))$′ with respect to the road coordinate system $(X_E\ Y_E)$. As shown in Figure 1 with $(X_E\ Y_E)$ coordinate system fixed to the ground, the angle between the vehicle longitudinal axis and the X_E axis is the yaw angle (heading angle ′ψ′). Also the angle between the vehicle velocity vector at the center of gravity (cg) and road X_E axis is denoted as $(\beta + \psi)$.

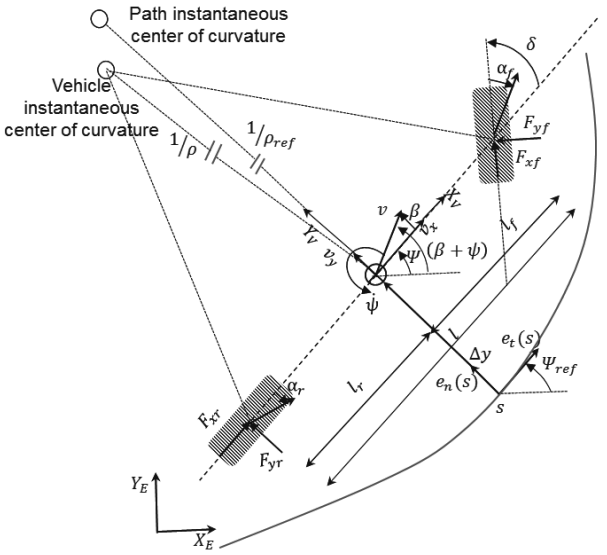


Fig. 1: Illustration of vehicle motion in road fixed coordinate system

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

The vehicle lateral guidance state variable with respect to road or reference frame $(X_E\ Y_E)$ is defined as follows:

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{y}\\ \Delta\dot{\psi}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}V_y\\ \dot{\psi}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\Delta\psi\\ -\rho_{ref}\end{bmatrix} V_x,\ \begin{bmatrix}\Delta\dot{y}\\ \Delta\dot{\psi}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}V_y\\ \dot{\psi}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\Delta\psi V_x\\ \dot{\psi}_d\end{bmatrix} \quad (3)$$

With $\dot{\psi}_d = \rho_{ref} V_x$ is the desired vehicle yaw rate with respect to the reference road curvature ρ_{ref} . By taking time derivative of the equation (3) and thereafter substituting the vehicle lateral state motion expression as derived in equation (2) one get

$$\begin{bmatrix}\Delta\ddot{y}\\ \Delta\ddot{\psi}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\dot{V}_y\\ \ddot{\psi}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\Delta\psi\dot{V}_x + \Delta\dot{\psi}V_x\\ \ddot{\psi}_d\end{bmatrix} = A\,x + Bu + Ed + \begin{bmatrix}\Delta\psi\dot{V}_x + \Delta\dot{\psi}V_x\\ \ddot{\psi}_d\end{bmatrix} \quad (4)$$

Substituting the value of $V_y = \Delta\dot{y} - \Delta\psi V_x$ and $\dot{\psi} = \Delta\dot{\psi} - \dot{\psi}_d$ as follows

$$\begin{aligned}\Delta\ddot{y} &= a_{11}\,\Delta\dot{y} - a_{11}\Delta\psi V_x + a_{12}\Delta\dot{\psi} - a_{12}\dot{\psi}_d + b_{11}\delta_f + e_{11}\,\Delta M_{zz} + \Delta\dot{\psi}V_x + \Delta\psi\dot{V}_x\\ \Delta\ddot{\psi} &= a_{21}\,\Delta\dot{y} - a_{21}\Delta\psi V_x + a_{22}\Delta\dot{\psi} - a_{22}\dot{\psi}_d + b_{21}\delta_f + e_{21}\,\Delta M_{zz} + \ddot{\psi}_d \end{aligned} \quad (5)$$

With proper simplifications and substitution under constant vehicle longitudinal velocity $\dot{V}_x = 0$, the linear lateral state space model of vehicle in terms of error state variable with respect to the reference road frame can be written as follows

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{y}\\ \Delta\ddot{y}\\ \Delta\dot{\psi}\\ \Delta\ddot{\psi}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & a_{11} & (a_{11}V_x) & (a_{12} + V_x)\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & a_{21} & (-a_{21}V_x) & a_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta y\\ \Delta\dot{y}\\ \Delta\psi\\ \Delta\dot{\psi}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ b_{11}\\ 0\\ b_{21}\end{bmatrix}\delta_f + \begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ e_{11} & -a_{12} & 0\\ 0 & 0 & 0\\ e_{21} & -a_{22} & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta M_{zz}\\ \dot{\psi}_d\\ \ddot{\psi}_d\end{bmatrix} \quad (6)$$

If a certain desired trajectory has been determined by a trajectory planning module, it still needs to be executed. This task of trajectory motion control is usually taken over by a separate module known as trajectory guidance controller. In the subsequent subsection, based on the above derived lateral vehicle planner dynamics motion in road coordinates, three different lateral path following controllers, mainly, 1) Linear Sliding Mode Control (TGC1) based on vehicle yaw rate control to follow the desired course, 2) Linear PD control based (TGC2) on feedback of lateral error and its derivative and 3) Potential field based (TGC3) on feedback of actual lateral error and relative yaw angle error are presented and tested on an Electric Pow-

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

er Steering (EPS) Hardware-in-loop (HIL) test bench for various driving maneuvers considering stability and robustness against external disturbances (e.g. side wind etc.)

Controller Type	Control Law (time domain)
Sliding Mode Control (TGC1)	$\delta_{f,d} = \frac{1}{b_{21}}\left(\ddot{\psi}_{d,(\tau_p)} - K_{\dot{\psi}}(\dot{\psi} - \dot{\psi}_{d,(\tau_p)}) - a_{21}V_y - a_{22}\dot{\psi} - e_{21}\Delta M_{zz} - \eta_{\dot{\psi}} \tanh\left(\frac{S_{\dot{\psi}}}{\varphi_{\dot{\psi}}}\right)\right) e^{(-\tau_r t)}$
Proportional Derivative Control (TGC2)	$\delta_{f,d} = \left(K_P\left(\Delta y(\tau_p)\right) + K_D\left(\Delta \dot{y}(\tau_p)\right)\right) e^{(-\tau_r t)}$
Potential Field Control (TGC3)	$\delta_{f,d} = \frac{2K_{PF}(\Delta y(\tau_p))}{C_f} e^{(-\tau_r t)} = \frac{2K_{PF}(\Delta y + l_s \Delta\psi)}{C_f} e^{(-\tau_r t)}$

Fig. 2: Overview of different lateral trajectory controller used in this work [1]

In Figure 3, the evaluation results of the three TGC controllers (refer Figure 2.) for different closed loop maneuver on EPS HIL test bench is shown. The overview of the test bench with driving simulator used in this study is shown in Figure 4. The test bench can be operating in two modes mainly, driving simulator mode and test bench mode. In the test bench mode, a steering robot executes a predefined steering inputs or steering wheel angle generated by the TGC, whereas a linear motor applies a predefined load rack force inputs from the vehicle model running on real-time hardware from the company *dSPACE*. Accurate sensors mounted on the test bench measure important steering state attributes such as steering column angle, velocity, EPS torque as well as rack force, rack position and velocity. Further information about the experimental setup can be found in [3]. The goal of this experimental evaluation is to generate a steering command for testing of closed loop steering maneuver in order to match the desired response while keeping the vehicle lateral states stable. As seen from the Figure 3, all the three TGC are able to keep the vehicle states within bounds to maintain controllability and maintain the given desired path. In the third row, as a test case of disturbance correction in the form of sudden crosswind is considered. The side wind catches the car at x=300 m perpendicularly from the car side with a wind speed of 100 Km/h. All the TGC controller correct this disturbance and bring back the vehicle back to center. The given results are obtained for a given TGC controller set parameters which are subject to be optimized and application to get the optimum test results.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

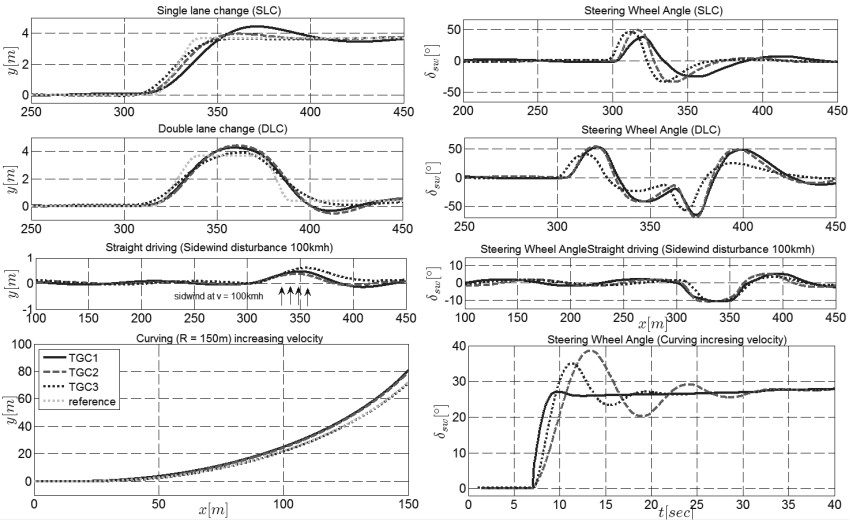


Fig. 3: EPS HIL test bench results for different lateral trajectory path following controller

3. Identification of Driver Steering Model Parameter Estimation

In situations, where a human controls the machine, the human controller plays an important role in controlling and guiding the motion. From this point of view, a simple model that simulates the human's steering behavior can be derived and made to represent the human functions as the controller. Various transfer functions have been proposed to suit different driving task and conditions. The present work discusses driver feed-back lateral control behavior, being motivated by HIL experiments (refer Figure 4) with the intention to derive relevant human driver feedback trajectory steering control model parameters. Therefore, in this study the focus was on examining the relationship between driver steering input and the motion cue visual feedback in the form of course information and vehicle state feedback. With this intent, three test participants took part in the Driving simulator mode experiment in which they were asked to perform the obstacle avoidance maneuver (single lane change). When the test participant's driver operates the steering wheel of the force feedback actuator, the rotary encoder of the steering torque generator measures the steering angle which is used as a set point angle for the steering robot. The feedback steering wheel actuator provides the force feedback or the steering feel of the EPS at the same time to the participants [4]. The standard *dSPACE ASM Motion Desk* is used for the visualization of the vehicle motion as motion cue feedback for test participants.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

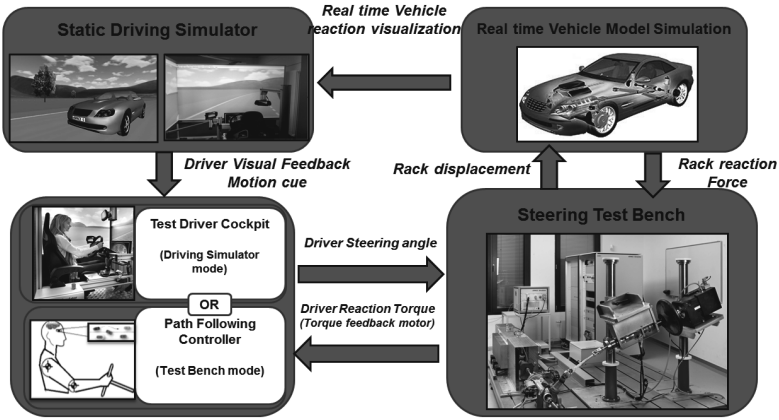


Fig. 4: EPS HIL test bench with fixed-base driving simulator experimental setup

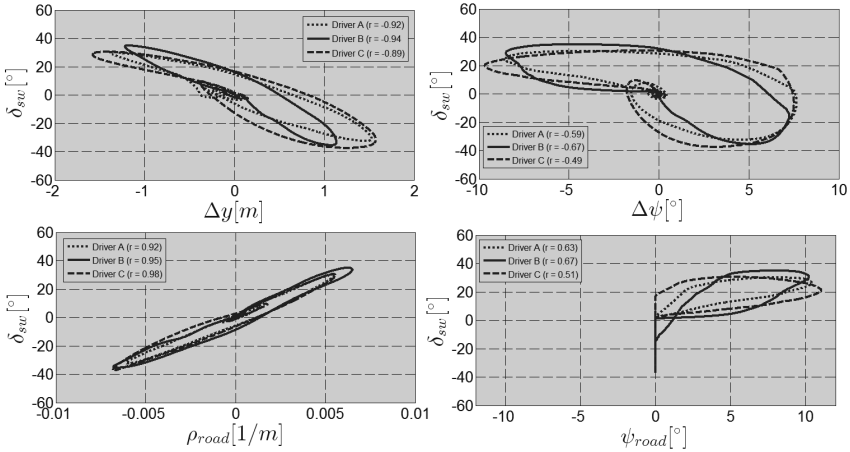


Fig. 5: Co-relationship (‘r’) between test participants average steering angle and different course information from fixed-base driving simulator experimental setup for SLC maneuver

Figure 5 shows the correlation *(‘r’)* between the steering angle of driver *(δ_{sw})* and the various visual feedback inputs. The driver inputs from the environment are road curvature (ρ_{road}) and road yaw angle (ψ_{road}), relative vehicle lateral displacement *($'\Delta y'$)* from the course and the relative heading error *($'\Delta\psi'$)*. As found from the Figure 5, there exist a high correlation *(‘r’)*

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

between the driver steering input and the road curvature (ρ_{road}) and some degree of correlation between road course angle (ψ_{road}) and steering. As this information is environmental input they are mainly responsible for the driver's feedforward (anticipation) steering behavior. Also as evident, that relative vehicle lateral deviation (Δy) and the vehicle yaw angle error ($\Delta\psi$) shows a high negative correlation with respect to driver steering input. Thus these two state attributes are possible state attributes to be used as feedback steering control of driver. In the next part, based on the obtained correlation analysis, a simple linear continuous lateral error feedback control model (TGC2) is used to derive and estimate the driver visual steer control parameters by offline optimizing the TGC2 model parameters, namely driver proportional 'K_P', driver total steer action time lag (τ_r) and driver preview time constant (τ_p) respectively during an evasive lane change maneuver to best fit the actual measured steer angle obtained from the EPS test bench experiment with different test participants as shown in the Figure 4. Under the assumption that derivative control action is zero ($K_D = 0$) and under small value of 'τ_r', the TGC2 model is expressed in Laplace domain as below:

$$\delta_{\mathrm{sw},d}(s) = K_P\left(y_d(s) - \left(y(s) + \tau_p\, s\, y(s)\right)\right)e^{-\tau_r s} = \frac{K_P}{(1+\tau_r s)}\left(y_d(s) - (y(s) + \tau_p\, s\, y(s)\right) \quad (7)$$

A cost function (similar to [2]) that describes the difference between the actual measured steering angle, and the estimated model steer angle (TGC2) is written as follows:

$$\mathrm{e}(s) = \delta_{\mathrm{sw}}(s) - \delta_{\mathrm{sw,d}}(s) = \delta_{\mathrm{sw}}(s)(1 + \tau_{\mathrm{r}}s) - \mathrm{K_P}\left(\mathrm{y_d}(s) - \left(\mathrm{y}(s) + \tau_{\mathrm{p}}\,\mathrm{s\,y}(s)\right)\right)$$

$$\mathrm{J} = \int_0^{\mathrm{T}} \mathrm{e}^2 \mathrm{dt} = \int_0^{\mathrm{T}} \left[\delta_{\mathrm{sw}} + \tau_{\mathrm{r}}\,\dot{\delta}_{\mathrm{sw}} - \mathrm{K_P}\,(\mathrm{y_d} - (\mathrm{y} + \tau_{\mathrm{p}}\,\dot{\mathrm{y}}))\right]^2 \mathrm{dt} \quad (8)$$

Based on matlab code of "fmincon" based optimization method, the TGC2 model parameters are estimated offline based on the HIL experiment which minimizes the cost function (refer equation (8)). As seen from the Figure 7, the measured mean and estimated steer angle shows god accuracy and agreement with each other which means that the identified driver lateral trajectory steer angle controller i.e. TGC2 can be parametrized to follow and characterize different driver steering behavior for the manual lane position control task. Figure 6 depicts the correlation between the different identified driver lateral steer controls parameters based on model of TGC2 i.e. how the human driver adapts his or her control parameters to achieve the desired task. In this case it is evident from the Figure 6 that the driver equalizes his or her steering lag or response delay by preview lead (or look ahead τ_p) term which is clustered for all the test participants around 0.8 to 1 sec.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

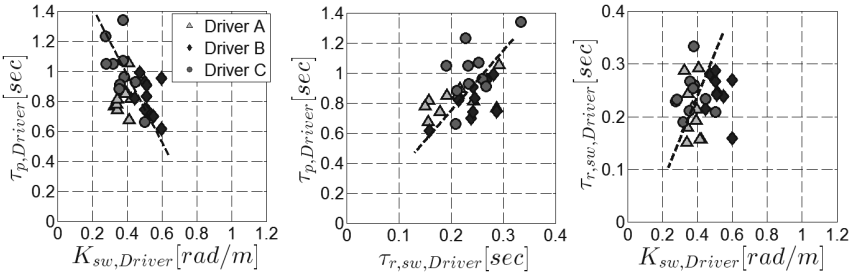


Fig. 6: Offline identified driver steer control parameters from the experiment on EPS HIL test bench with three test participants for SLC maneuver with fixed-base driving simulator.

As seen from the scatter plot of (K_{sw}, τ_p) values appear to satisfy a relationship, meaning that smaller preview time constant correspond to larger steering gains (K_{sw}). Here, human steering gain $\mathrm{K_{sw}}$ represents the proportional gain $'K_P'$. Clearly, a smaller preview time constant (τ_p) for a certain given path curvature will lead to smaller path deviations and therefore a larger steering driver gain in order to obtain the same steering response. Figure 7 shows the mean trajectory of vehicle and respective steer angle profile for each test participant. As seen that the test participants (Driver B) follow or perform the obstacle avoidance more closely with less overshoot than test participant (Driver A and C). This is due to the reason that the Driver B generates the steer angle much aggressive/ faster and higher in amplitude (high steering gains $'K_{sw}'$) for the first phase of lane change and thereby compensates the lateral path error much more efficient with almost no overshoot. This results in less steering correction for the Driver B during the second phase of lane change. In the case of Driver A and Driver C, the vehicle trajectory shows overshoot and hence steering corrections due to the reason that the driver steer generation is slow (maxima displaced in *x* direction) for the fast phase of lane change and thus Driver A and C has more steer correction in the second steering phase.

Figure 8 shows the EPS HIL test bench results from TGC2 parameterized for each Driver types. Comparing with the mean trajectories of the test participants (Driver A, B, C), the parametrized TGC2 trajectory matches well with the each individual test experiment driver respectively. But as can be seen, the steering profile for the measured test experiment driver and TGC2 control shows slightly different steering profile for the maneuver. This is due to the fact that the human driver not only has a feedback control loop (lateral error compensation) but also it has an anticipatory or feedforward part. This effect is quite visible for each test

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

participant (Driver) at the start of SLC maneuver i.e. the steering wheel angle build up in anticipation behavior of the coming lane change which is not visible in ideal lateral error compensation or feedback driver model (TGC2).

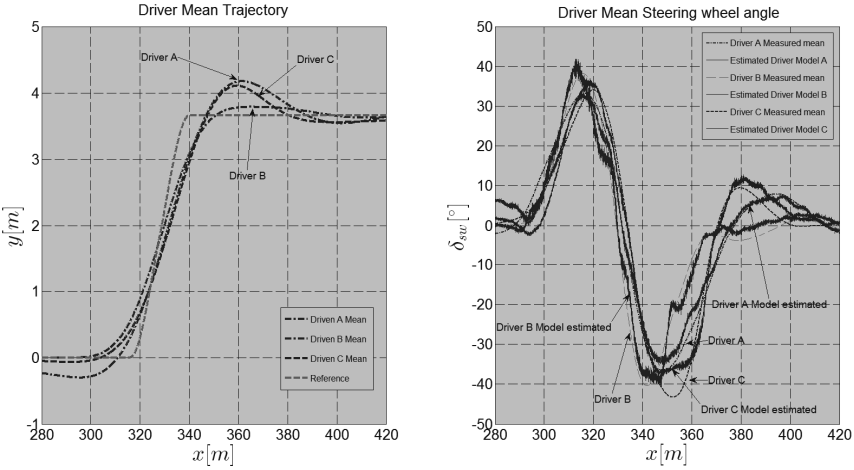


Fig. 7: Measured mean and TGC2 model based estimated driver steer angle trajectory for SLC maneuver for three test participants during EPS HIL test bench experiment

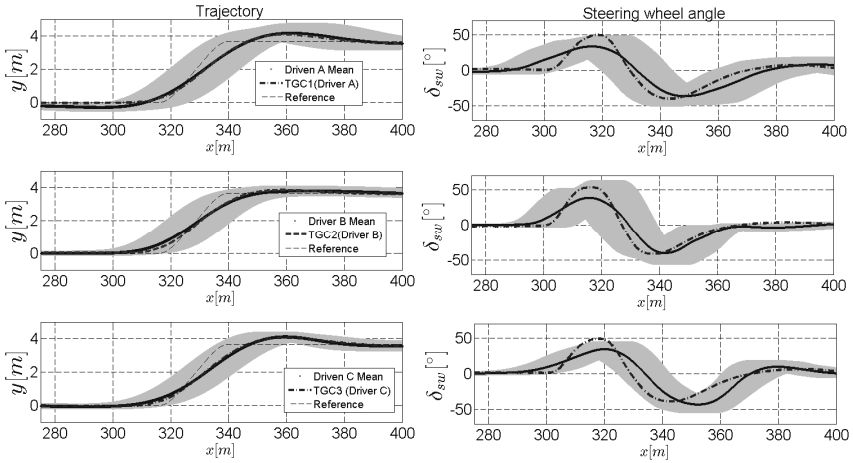


Fig. 8: Measured test driver mean, mean $\pm$ standard deviation (σ) and parametrized TGC2 controller trajectory profile for SLC maneuver during EPS HIL test bench experiment

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

5. Conclusion

The presented paper focus on to estimate and understand human driver steer behavior and subsequently to develop a simple but well-structured human-like steering control model in order to individualize human steering control behavior in EPS HIL test bench simulation environment. For this, the steering behavior are examined for the ordinary test participants driver in emergent lane change maneuver using EPS HIL test bench with fixed base driving simulator. From the gathered experimental test data, the mathematical lateral driver steering feedback control model is derived in terms of the parameters that have definite physical meanings reflecting the nature of human steering control mechanism. The parameterized driver lateral trajectory controller (TGC) is implemented on an EPS HIL test bench steering robot. The implemented trajectory controller is shown to steer similar to how a human driver would drive along a predefined trajectory such as Single lane change (SLC) and Double lane change (DLC). In the future, the interaction of human driver and the feedback steering torque (haptic guidance) will be investigated on the driver steering control performance.

Literature:

[1] Bolia P, Weiskircher T, and Müller S. “Driver steering model for closed loop steering function analysis”, Vehicle System Dynamics, Vol. 52, Supplement 1, 251-271, 2014.

[2] Masato A, and Yoshio K. “A Study on Vehicle Handling Evaluation by Model Based Driver Steering Behavior”, In Proceedings of FISITA 2008, Munich, Germany.

[3] Stauder S, Müller S, Plöger A, Lehmann A. Concept of a New Hardware-in-the-Loop Driving Simulator for the Model-Based Design of Mechatronic Steering Systems. 12th Stuttgart International Symposium, Automotive and Engine Technology, Stuttgart, Germany, March 13–14; 2012.

[4] Fankem, S, and Müller, S. “Steering feel generation in steer-by-wire vehicles - modular steering torque computation and requirements for the hand wheel actuator”. In Proceedings of the 5th International Munich Chassis Symposium, Munich, Germany.

https://doi.org/10.51202/9783181022924 - Generiert durch IP 216.73.216.36, am 18.01.2026, 04:52:36. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.