

Simon Göltz

Online Bremsperformance-Schätzung für Lastkraftwagen

Band 81

**Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart**



Online Bremsperformance-Schätzung für Lastkraftwagen

Von der Fakultät
Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Simon Mario Göltz

geboren in Schorndorf

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Oliver Sawodny
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Sören Hohmann
Tag der mündlichen Prüfung: 07. Oktober 2024

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2024

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 81

Simon Göltz

**Online Bremsperformance-Schätzung
für Lastkraftwagen**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2024

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9695-8

ISSN 1863-9046

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart. Ich danke daher insbesondere dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Oliver Sawodny, für die Möglichkeit zur Mitarbeit und Promotion, das entgegengebrachte Vertrauen, die gewährten Freiheiten und die Übernahme des Hauptberichts dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Sören Hohmann vom Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme des Karlsruher Instituts für Technologie danke ich für die freundliche Übernahme des Mitberichts. Für die bereitwillige Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner vom Institut für Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart.

Wesentliche Inhalte dieser Arbeit entstanden im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit der Knorr-Bremse Systeme für Nutzfahrzeuge (SfN) GmbH. Hier bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen für die Unterstützung, insbesondere bei Adnan Mustapha und Dr.-Ing. Ulrich Gücker, die dieses Projekt ermöglicht und mich betreut haben. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Andreas Buch, Dr.-Ing. Falk Hecker, Roman Sauer, Dr.-Ing. Paul Witzel und Hendrik Telges für die vielfältige Unterstützung und die wertvollen Anregungen.

Meinen Institutskollegen danke ich ganz herzlich für die vielfältig fachliche Unterstützung und das freundschaftliche Miteinander in all den Jahren. Dieser Dank gilt insbesondere meinen Bürokollegen Dr.-Ing. Max May, Daniel Ossig, Simon Speidel und Kelvin Wittmer. Ganz besonders bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Michael Böhm, Mark Burkhardt, Dr.-Ing. Andreas Gienger, Bernd Müller, Anton Renner, Dr.-Ing. Michael Ringkowski, Dr.-Ing. Stefan Schaut und Matthias Thomas für die Unterstützung und Begleitung verschiedenster Weise auf meinem Weg zur Promotion. Herrn Dr.-Ing. Eckhard Arnold danke ich für viele hilfreiche Gespräche, Diskussionen und fachliche Anregungen. Bei Corina Hommel und Gerlind Preisenhammer bedanke ich mich für die organisatorische Unterstützung. Meinen Studierenden danke ich für ihre Mitarbeit in Form von Diskussionen, wissenschaftlichen Tätigkeiten und Abschlussarbeiten.

Ganz besonders danke ich meiner Familie, meinen Freunden und insbesondere meiner Frau Steffi für die verlässliche und liebevolle Unterstützung, den Rückhalt und die Rücksicht während Studium und Promotion. Vielen Dank für euer Verständnis und das Vertrauen in mich.

Stuttgart, im Oktober 2024

Simon Göltz

Kurzfassung

Weltweiter Handel und steigender Wohlstand führen zu wachsendem Güterverkehrsaufkommen, dem aufgrund demographischen Wandels und dem damit einhergehenden Fachkräftemangel eine sinkende Verfügbarkeit an Fernfahrern entgegensteht. Der Ausbau alternativer Transportwege wie der Binnenschifffahrt oder des Bahnnetzes ist aufwendig und scheitert zumeist an fehlender Infrastruktur, während Ansätze zur Erhöhung der Transportleistung von Lastkraftwagen, beispielsweise Gigaliner, sich aufgrund von Sicherheitsbedenken nur schwer durchsetzen. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Güterverkehrsleistung trotz sinkenden Personalangebots stellt die Automatisierung des Sektors dar. Autonom fahrende LKWs erfordern jedoch, dass die Umgebungsbedingungen, insbesondere der Reibwert der Straße, bekannt sind, um die Bremsperformance des Fahrzeugs abschätzen zu können.

In dieser Arbeit wird ein System zur Schätzung des Straßenreibwertes vorgestellt. Dazu wird serienmäßig verbaute Sensorik mit einer Geschwindigkeitsmessung basierend auf GPS in einem Dividierte-Differenzen-Filter zweiter Ordnung kombiniert und damit sowohl die Fahrzustände als auch der Reibwert geschätzt. Das physikalische Entwurfsmodell, bestehend aus einem vereinfachten Zweispurmodell mit nichtlinearem Magic-Formula-Reifen-Modell, kann durch Parametrierung auf die jeweilige, im Nutzfahrzeug-Sektor sehr variable, Fahrzeugkonfiguration angepasst werden. Eine Sensitivitätsanalyse der Parameter zeigt, welche Parameter genau ermittelt werden müssen. Daraus abgeleitet wird insbesondere für die zeitvarianten Reifenparameter eine Langzeitadaption entworfen. Untersuchungen zu Eigenwerten und Beobachtbarkeit zeigen, dass eine Fahrdynamikschätzung in nahezu allen Fahrzuständen und eine Reibwertschätzung bei hinreichender Anregung möglich sind. Die Ergebnisse werden simulativ validiert, bevor eine vereinfachte, ausschließlich longitudinale, Reibwertschätzung entwickelt und anhand realer Messdaten mit der vollständigen Reibwertschätzung verglichen wird.

Zur Anwendung für automatisiertes Fahren wird insbesondere eine Reibwertprädiktion für die nachfolgenden Streckenabschnitte benötigt. Dazu wird final ein Konzept zur Erstellung einer Reibwertkarte anhand von Reibwertschätzungen mehrerer Fahrzeuge beziehungsweise beliebiger Fahrzeugkonfigurationen vorgestellt.

Abstract

Global trade and growing wealth has led to increased freight traffic volume, which is in conflict with the decreasing availability of truck drivers due to the skills shortage caused by recent demographic changes. Expansion of alternative transportation routes, such as water or rail transportations, is costly and often fails due to missing infrastructure. Possibilities for improvements of the capacity of on road transportation, like the usage of gigaliners, are rarely implemented due to safety concerns. Another possibility for improvements in the traffic capacity is the automation of the transportation sector. Fully automated vehicles demand for a reliable analysis of the environment in addition to the already existent perception of the state of the vehicle. One main aspect of these conditions is the road friction coefficient between road and vehicle, which determines the brake performance and is affected by many external influences.

In this dissertation, a system for estimating the road friction coefficient is developed. Measurements of series sensors are combined with GPS-data in a second order divided-differences-filter to estimate the vehicle state and additionally the friction coefficient. The physical design model, consisting of a simplified dual track model with nonlinear Magic-Formula-Tire model, can be adapted by parameterization to the vehicle configuration, which has high variability in commercial vehicles. A sensitivity analysis of the model parameters shows which parameters need to be precisely known. Derived from this analysis a long-term parameter adaptation especially for time variant tire parameters is designed. Analysis of eigenvalues and observability shows that an estimation of the vehicle dynamics is possible in nearly all driving situations, while an estimation of the road friction coefficient is possible with sufficient excitation. These results are validated with a simulation model before a simplified estimation algorithm using exclusively longitudinal excitation is developed, analyzed and compared with the full estimation on real world measurement data.

An application of these algorithms to automated driving requires knowledge of the estimated road friction coefficient for the subsequent road sections. Therefore, a concept for creating a map of the road friction coefficient out of estimates from several vehicles in different vehicle configurations is finally shown.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Stand der Technik	5
1.3	Vorstellung des Versuchsträgers	10
1.4	Aufbau der Arbeit	11
2	Erstellung eines Fahrzeugmodells	13
2.1	Grundlagen des Fahrzeugmodells	14
2.1.1	Verwendete Koordinatensysteme	15
2.1.2	Systemzustände und Eingänge	17
2.2	Modellierung der Fahrzeugdynamik	19
2.2.1	Modellierung der Aufbaudynamik	20
2.2.2	Modellierung der Raddynamik	24
2.2.3	Validierung der Fahrzeugdynamik	26
2.3	Modellierung des Bremssystems	29
2.3.1	Modellierung des Bremsfaktors	31
2.3.2	Modellierung der Bremsentemperatur	31
2.3.3	Identifikation und Validierung des Bremssystems	36
2.4	Modellierung der Lenkung	41
2.4.1	Identifikation und Validierung der Lenkung	42
2.5	Modellierung der Reifencharakteristik	43
2.5.1	Modelle in der Literatur	44
2.5.2	Der dynamische Radradius	46
2.5.3	Das Reifenmodell Tire Model Easy	47
2.5.4	Das Magic-Formula-Reifenmodell	50
2.5.5	Identifikation und Validierung der Reifencharakteristik	51
2.5.6	Parameter- und Sensitivitätsanalyse des MFT-Modells	53
3	Online Bremsperformance-Schätzung	59
3.1	Ableitung eines Entwurfsmodells	60
3.1.1	Modellierung des vereinfachten Zweispurmodells	61
3.1.2	Näherung der Nick- und Wankdynamik	62
3.1.3	Sensitivitätsanalyse der Modellparameter	64
3.2	Beobachter für den dynamischen Radradius	66

3.3	Langzeitschätzung der Reifenparameter	70
3.3.1	Schätzung in longitudinaler Richtung	70
3.3.2	Schätzung in lateraler Richtung	73
3.4	Analyse der Beobachtbarkeit	77
3.5	Auswirkungen von Sensorfehlern auf die Reibwertschätzung	80
3.5.1	Auswirkungen von Fehlern der Geschwindigkeitsmessung	82
3.5.2	Korrektur der Geschwindigkeitsmessung	87
3.5.3	Auswirkungen von Fehlern der Beschleunigungsmessung	88
3.5.4	Korrektur der Beschleunigungsmessung	90
3.5.5	Auswirkungen von Messrauschen	97
3.6	Schätzung des Reibwertes	99
3.6.1	Modellanpassungen zur Verwendung im DD2	101
3.6.2	Auswirkungen der Diskretisierung auf die Reibwertschätzung	102
3.6.3	Aktivierung der Reibwertschätzung	105
3.6.4	Anwendung am Simulationsmodell	107
3.7	Vereinfachte Reibwertschätzung in longitudinaler Richtung	109
3.8	Vergleich der Verfahren BPE und sBPE	113
4	Reibwertprädiktion für nachfolgende Streckenabschnitte	123
4.1	Konzept zur Reibwertprädiktion	123
4.2	Konzept zur Erstellung einer Reibwertkarte	125
4.2.1	Datenbasis zur Erstellung der Karte	126
4.2.2	Methodik zur Erstellung der Karte	128
4.2.3	Vergleich der Verfahren	143
5	Zusammenfassung	147
A	Ergänzungen zur Sensitivitätsanalyse der Modellparameter	149
B	Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate	153
C	Beobachtbarkeit dynamischer Systeme	155
D	Filterung der Signale zur Offsetkorrektur	157
E	Ergänzungen zu Auswirkungen von Offsetfehlern	159
F	Ergänzungen zu Auswirkungen von Messrauschen	163
G	Dividierte-Differenzen-Filter zweiter Ordnung	167
H	Maschinelle Lernverfahren	171
H.1	Klassifikation: Support-Vectormachine	171

H.2 Klassifikation: k-nächste Nachbarn	172
H.3 Regression: k-nächste Nachbarn	173
H.4 Regression: Gaußprozess	173
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	177
Abbildungsverzeichnis	191
Tabellenverzeichnis	195
Literaturverzeichnis	197