



Technische
Universität
Braunschweig

INSTITUT FÜR
mobile Maschinen
und Nutzfahrzeuge



Forschungsberichte

Alexander Buß

**Steigerung der Energieeffizienz von
schweren Nutzfahrzeugen im
Straßengüterverkehr durch
prädiktive Regelansätze**

Herausgeber:
Freundes- und Förderkreis des Instituts
für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge e.V.

Shaker Verlag

Steigerung der Energieeffizienz von schweren Nutzfahrzeugen im Straßengüterverkehr durch prädiktive Regelansätze

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Alexander Buß

geboren in: Kulmbach

eingereicht am: 08.07.2022

mündliche Prüfung am: 04.11.2022

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Roman Henze

Gutachter: Prof. Dr. Ludger Frerichs

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Forschungsberichte aus dem
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

Alexander Buß

**Steigerung der Energieeffizienz von schweren
Nutzfahrzeugen im Straßengüterverkehr durch
prädiktive Regelansätze**

Shaker Verlag
Düren 2023

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8919-6

ISSN 2196-7369

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 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig in Kooperation mit der MAN Truck & Bus SE in München im Zeitraum von April 2018 bis November 2021. Während dieser Zeit bin ich von zahlreichen Menschen begleitet worden, denen mein Dank gebührt.

Meinem Doktorvater, Professor Ludger Frerichs, danke ich für die fachliche Betreuung, die vielen lehrreichen Anregungen sowie das äußerst angenehme zwischenmenschliche Verhältnis. Zudem bedanke ich mich bei Professor Markus Lienkamp für die Übernahme des Koreferats und bei Professor Roman Henze für den Vorsitz der Promotionskommission.

Den Mitarbeitern am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit und vor allem dafür, dass ich mich trotz meiner seltenen Besuche in Braunschweig, die zum einen der großen Entfernung nach München, zum anderen der Corona-Pandemie geschuldet waren, nie fremd fühlte.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei der MAN Truck & Bus SE als Projektpartner. Thomas Ille, Urs Gunzert und Dr. Stefan Kerschl danke ich für die gute Integration in ihre jeweilige Abteilung. Mein außerordentlicher Dank gilt zudem Dr. Christian Haupt, der mir als Betreuer vor Ort während der kompletten Projektlaufzeit zur Seite stand und mich fachlich exzellent unterstützte. Allen anderen Kolleginnen und Kollegen danke ich für ihre fachliche Unterstützung, die große Hilfsbereitschaft und das angenehme Arbeitsklima. Andreas Link, André Hirsch, Johannes Lohmann, Valentin Stadler und Rebecca Reinkunz trugen im Rahmen ihrer studentischen Abschlussarbeiten wesentlich zum Gelingen der vorliegenden Dissertation bei.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich während meines gesamten Lebens in allen Belangen bedingungslos unterstützt haben. Von ganzem Herzen danke ich zudem meiner Ehefrau Julia für die außerordentliche Unterstützung und das mir entgegengebrachte Verständnis während der zahlreichen Stunden, die in diese Arbeit geflossen sind. Besonders danke ich ihr aber auch für das wunderbare Leben, das ich mit ihr habe.

Mühdorf am Inn, im Januar 2023

Alexander Buß

Für Julia.

Für Jonathan, Simon und Hannah.

Kurzfassung

Die zu erwartende weitere Zunahme des Straßengüterverkehrs in Deutschland bei gleichzeitig höheren Anforderungen an die Reduktion von Treibhausgasemissionen sowie verstärktem Mangel an Berufskraftfahrern stellt die Lkw-Branche vor große Herausforderungen. Eine umfangreiche Automation des Straßengüterverkehrs ermöglicht es, diesen Herausforderungen zu begegnen. So kann mithilfe eines automatisierten Fahrzeugbetriebs einerseits die energieeffiziente Fahrzeuglängsführung sichergestellt und andererseits die Anzahl benötigter Fahrer reduziert werden. Eine besonders vielversprechende Möglichkeit stellt in diesem Zusammenhang das Kolonnenfahren zweier oder mehrerer elektronisch gekoppelter Lkw im Fernverkehr bei geringen Fahrzeugabständen dar. Ein zentraler Vorteil dieser Platooning-Technologie ist die Reduktion des Luftwiderstands aller Kolonnenfahrzeuge bei besagten geringen Abständen und die damit einhergehende Reduktion der zum Fahren benötigten Energie.

Übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Energieeffizienz von Lkw-Kolonnen weiter zu steigern. Dabei bieten vor allem die gezielte Variation des Abstands zwischen den Einzelfahrzeugen im Rahmen eines zentralen Regelansatzes sowie die Verwendung von batterieelektrisch betriebenen Lkw innerhalb der Kolonne entsprechendes Potential. Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen der Bremsenergierückgewinnung batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge auf die Längsdynamik und die Energieeffizienz von Kolonnen sind in der Literatur rar.

Zur Ausnutzung des beschriebenen Potentials werden auf modellprädiktiven Verfahren basierende Kolonnenlängsdynamikregler unterschiedlicher Lösungsverfahren umgesetzt. Diese ermöglichen die Berücksichtigung des vorausliegenden Streckensteigungsverlaufs und somit eine im Sinne der Energieeffizienz zielführende Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeiten an die Topographie. Die entwickelten Regler werden innerhalb einer Simulationsumgebung hinsichtlich ihrer Eignung zur Energieeffizienzsteigerung miteinander verglichen. Ein dem Lösungsverfahren der direkten Methoden zuzuordnender Ansatz stellt sich hierbei als besonders geeignet heraus. Mit diesem kann simulativ eine gesteigerte Energieeffizienz von Lkw-Kolonnen nachgewiesen werden. Untersuchungen zu längeren realen Streckensteigerungsverläufen deutscher Bundesautobahnen ermöglichen zudem eine Quantifizierung dieses Einsparpotentials.

Insgesamt leistet die vorliegende Arbeit einen zentralen Beitrag zur detaillierten Untersuchung des Potentials modellprädiktiver Regelansätze zur weiteren Energieeffizienzsteigerung von Kolonnen aus Lkw mit verbrennungsmotorischen und batterieelektrischen Antrieben.

Abstract

The expected further increase in road freight transport in Germany, combined with higher requirements for the reduction of greenhouse gas emissions and an increased shortage of professional drivers, presents the truck industry with huge challenges. An extensive automation of road freight transport makes it possible to meet these challenges. With the help of automated vehicle operation, energy-efficient longitudinal vehicle guidance can be ensured on the one hand and the number of drivers required can be reduced on the other. A particularly promising possibility in this context is driving in convoys of two or more electronically coupled trucks in long-distance traffic with small inter-vehicle distances. A central advantage of this platooning technology is the reduction of the air resistance of all vehicles in the convoy with said small distances between them and the associated reduction in energy required for driving.

The overarching goal of this work is to further increase the energy efficiency of truck convoys. In particular, the targeted variation of the distance between the individual vehicles as part of a central control approach and the use of battery-powered trucks within the convoy offer corresponding potential. Investigations addressing the effects of braking energy recovery in battery-powered vehicles on the longitudinal dynamics and the energy efficiency of convoys are rare in the literature.

In order to exploit the described potential, convoy longitudinal dynamics controllers based on model predictive methods are implemented using different solution methods. These enable the upcoming road gradient to be taken into account and thus a target-oriented adaptation of the vehicle speeds to the topography in terms of energy efficiency. The developed controllers are compared within a simulation environment with regard to their suitability for increasing energy efficiency. An approach that can be assigned to the solution procedure of direct methods turns out to be particularly suitable. With this, an increased energy efficiency of truck convoys can be proved by simulation. In addition, investigations of longer stretches of road with realistic gradients resembling those of German federal highways enable a quantification of this savings potential.

Overall, the present work makes a central contribution to the detailed investigation of the potential of model predictive control approaches to further increase the energy efficiency of truck convoys with internal combustion engine and battery-powered drives.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XV
Häufige Indizes	XVII
Abkürzungen	XIX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielstellung.....	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	3
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1 Lkw-Platooning.....	5
2.1.1 Vorteile und Herausforderungen.....	5
2.1.2 Technische Umsetzung.....	8
2.1.3 Luftwiderstandsbeiwertreduktion und Kraftstoffeinsparung.....	10
2.2 Modellprädiktive Regelung.....	14
2.2.1 Grundsätzliche Funktionsweise und Vorteile.....	14
2.2.2 Optimalsteuerungsproblem und Lösungsansätze.....	15
2.3 Längsdynamikregelverfahren für Lkw-Kolonnen.....	18
2.3.1 Unterscheidung nach dem Sollwert der Regelung.....	19
2.3.2 Dezentrale Ansätze der Kolonnenlängsregelung.....	19
2.3.3 Zentrale Ansätze der Kolonnenlängsregelung.....	21
2.3.4 Fazit zu energieeffizienten Kolonnenlängsdynamikregelansätzen.....	22
3 Zielsetzung, Methodik und Vorgehen	24
3.1 Steigerung der Energieeffizienz von Lkw-Kolonnen.....	24
3.2 Simulatives Testen unterschiedlicher Regelansätze.....	27
4 Entwicklung energieeffizienter Längsdynamikregler für Lkw-Kolonnen	30
4.1 Modellprädiktive Regelung für Lkw-Kolonnen.....	30
4.2 Grundlegende Annahmen und Definitionen.....	32
4.2.1 Wichtige geometrische Zusammenhänge in Fahrzeugkolonnen.....	32
4.2.2 Betrachtete Fahrzeugantriebskonzepte.....	33
4.3 Regelstreckenmodell und Optimierungsproblem.....	35
4.3.1 Allgemeine längsdynamische Zusammenhänge für Fahrzeugkolonnen.....	35

4.3.2	Vereinfachtes Modell zur Abbildung der Kolonnenlängsdynamik	37
4.3.3	Nebenbedingungen des Optimierungsproblems	39
4.3.4	Kostenfunktion des Optimierungsproblems	40
4.4	Lösungsverfahren für die modellprädiktive Kolonnenregelung	44
4.4.1	Dynamische Programmierung	44
4.4.2	Direkte Methoden	48
4.5	Forderung nach stetiger Differenzierbarkeit	49
4.5.1	Hyperbelfunktion Tangens hyperbolicus	49
4.5.2	Streckensteigung	50
4.5.3	Geschwindigkeit und Abstand der Kolonnenfahrzeuge	51
4.5.4	Energieverbrauch der Kolonnenfahrzeuge	52
5	Simulationsergebnisse zu Lkw-Kolonnenfahrten	54
5.1	Simulationsumgebung	54
5.2	Grundlegende Simulationsszenarien	58
5.3	Gegenüberstellung der entwickelten Regelverfahren	60
5.3.1	Parametrierung der Reglervorausschau	60
5.3.2	Auswahl des besten modellprädiktiven Lösungsansatzes	63
5.3.3	Plausibilisierung des ausgewählten Regelverfahrens	65
5.3.4	Validierung des ausgewählten Regelverfahrens	67
5.3.5	Vergleich von dynamischer Programmierung und direkten Methoden	69
5.4	Parametrierung batterieelektrisch betriebener Kolonnen	71
5.5	Nachweis der angestrebten Effizienzsteigerung	72
5.5.1	Zentraler Regelansatz	72
5.5.2	Bremsenergierückgewinnung batterieelektrischer Lkw	75
5.6	Quantifizierung der tatsächlich möglichen Effizienzsteigerung	79
5.6.1	Realitätsnahe Simulationsrandbedingungen	79
5.6.2	Zentraler Regelansatz	80
5.6.3	Bremsenergierückgewinnung batterieelektrischer Lkw	82
6	Fazit und praktischer Nutzen	83
6.1	Aussagekraft der Erkenntnisse zur Energieeffizienzsteigerung	83
6.2	Anwendbarkeit der Regelmethode für reale Kolonnen	85
7	Zusammenfassung	87
	Literaturverzeichnis	89