

Modellbildung und Regelung mechatronischer Systeme

Band 12

Lukas Pröhl

Optimierte Betriebs- und Fahrstrategien für elektrische Schienenfahrzeuge

Berichte aus dem
Lehrstuhl für Mechatronik
Universität Rostock

Herausgeber: Harald Aschemann



Optimierte Betriebs- und Fahrstrategien für elektrische Schienenfahrzeuge

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von
Lukas Pröhl,
geb. am 08.01.1990 in Greifswald

Rostock
10. August 2023

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann
Lehrstuhl für Mechatronik / Universität Rostock
Zweitgutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Horn
Lehrstuhl für Regelungstechnik /
Universität der Bundeswehr Hamburg

Tag der Verteidigung: 30. März 2023

Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Rostock
2023

Berichte aus dem
Lehrstuhl für Mechatronik
Universität Rostock

Band 12

Lukas Pröhl

**Optimierte Betriebs- und Fahrstrategien
für elektrische Schienenfahrzeuge**

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.: Rostock, Univ., Diss., 2023

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 978-3-8440-9174-8

ISSN 2195-9234

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 in den letzten sechs Jahren im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock.

Mein außerordentlicher Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann, der mich durch den fachlichen Austausch sowie durch zahlreiche Anregungen und Hinweise in meinem wissenschaftlichen Alltag sowie bei der vorliegenden Arbeit gefördert hat. Darüber hinaus möchte ich mich für das in mich gesetzte Vertrauen sowie die großartigen Rahmenbedingungen für Forschung und Lehre bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Horn für das Interesse an meiner Arbeit sowie für die Erstellung des Zweitgutachtens und vielen hilfreichen Anmerkungen bedanken.

Zudem möchte ich mich bei allen ehemaligen und aktiven Mitarbeitern des Lehrstuhls für Mechatronik, mit denen ich zusammenarbeiten durfte, für den konstruktiven Austausch und vor allem für die angenehme Zusammenarbeit bedanken. Im Besonderen bedanke ich mich bei meinem ehemaligen Bürokollegen Alexander Wache. Vielen Dank für deine tollen Ideen und dafür, dass du knifflig aussehende Probleme einfach darstellen kannst.

Bedanken möchte ich mich bei meiner Familie, die mich während des Studiums nach Kräften unterstützt und motiviert haben. Insbesondere danke ich meiner Freundin Franci, die durch ihr ausdauerndes Lektorat dafür gesorgt hat, dass die vorliegende Arbeit auch sprachlichen Ansprüchen gerecht wird.

Von Herzen möchte ich meiner Frau Maike und meiner Tochter Josephine danken – dafür, dass sie beide mit ihrer liebevollen Art dafür sorgen, dass meine Batterien immer wieder gefüllt werden.

Rostock, im Mai 2023

Lukas Pröhl

Kurzfassung

Die effiziente Nutzung von Rohstoffen und Energien ist eine zentrale Herausforderung der aktuellen Zeit. Damit verbunden ist eine nötige Elektrifizierung im gesamten Verkehrswesen. Diese kann nur gelingen, wenn gleichzeitig technologisch sowie gesellschaftlich Fortschritte erzielt werden können. Obwohl der Schienenverkehr als Vorreiter der elektrischen Mobilität gesehen werden kann, sind auch in diesem Bereich sowohl Forschung als auch Industrie auf der Suche nach potentiellen Energieeinsparungen. Die vorliegende Arbeit liefert Methoden zur Bestimmung von optimierten Betriebs- und Fahrstrategien für elektrisch angetriebene Schienenfahrzeuge. Hierbei steht vor allem die Optimierung des Energieverbrauchs des einzelnen Fahrzeugs im Fokus. Als Grundlage für die Untersuchungen dient dabei ein detailliertes Simulationsmodell für den elektrischen Antriebsstrang eines Schienenfahrzeugs. Das Simulationsmodell bildet einen generischen Triebstrang für verschiedene Antriebstopologien ab, sowohl Gleichstrom- als auch Wechselstromtopologien können damit untersucht werden. Auf Grundlage von vorliegenden Fahrplänen werden durch eine energieoptimierte Trajektorienplanung Geschwindigkeitsprofile berechnet, welche einen minimalen Verbrauch für die definierten Fahrzyklen erzielen. Basierend auf diesen Geschwindigkeitsprofilen lassen sich die resultierenden Leistungsverläufe einzelner Komponenten sowie des gesamten Antriebsstranges bestimmen. Durch eine Bilanzierung der Leistungsverläufe an den möglichen Energiequellen kann schließlich ein Gesamtenergieverbrauch für einen speziellen Fahrzyklus bestimmt werden.

Neben der angesprochenen Optimierung der Fahrstrategie lässt sich der Energieverbrauch des Fahrzeugs auch durch gezielte Eingriffe in die Betriebsstrategie minimieren. Als Freiheitsgrade für die Optimierung dienen hier zum einen die parallele Struktur der Antriebstopologie der untersuchten Schienenfahrzeuge, zum anderen wird eine zusätzliche Möglichkeit der Energiespeicherung betrachtet. Sowohl für die Lastaufteilung zwischen den parallelen Antriebssträngen als auch für die Betriebsstrategie des Energiespeichersystems werden Heuristiken hergeleitet, deren energieoptimale Parametrisierung durch den Einsatz von geeigneten Optimierungsmethoden erzielt wird. Da sich die drei untersuchten Strategien gegenseitig beeinflussen, werden die jeweiligen Wechselwirkungen auf die optimalen Lösungen untersucht und eine energieoptimale Kombination bestimmt.

Für die Optimierung der drei Strategien – Fahrstrategie, Betriebsstrategie des ESS, Lastverteilung auf parallele Antriebsstrukturen – wird ein zweistufiges Optimierungsverfahren eingeführt. Dafür werden die positiven Eigenschaften von schwarmbasierten Optimierungsverfahren genutzt, die es unter anderem ermöglichen, flache Minimalstellen vollständig zu erkennen und abzubilden. Die Verbindung aus einer geschickten Modellreduktion und dem zweistufigem Optimierungsansatz führt zu einer hohen Genauigkeit der Optimierung bei akzeptablem Rechenaufwand.

Die Ergebnisse der Optimierungsstrategien werden für unterschiedliche Beispiele von Zugkategorien vorgestellt. Eine Einordnung und Analyse der potentiellen Energieeinsparungen ist damit auch für die unterschiedlichen Anforderungen und Charakteristiken der verschiedenen Servicekategorien möglich.

Abstract

The efficient utilisation of resources and energy is one of the urgent challenges of the current civilisation. One step in the right direction is the electrification of the total transport and mobility systems. This step is associated with both technological and social progress. Despite the rail traffic plays a pioneering role regarding electrical mobility, both research as well as industrial partners are working for potential energy savings. The main objective of the present work is the development of optimized operating and driving strategies for electrically driven railway vehicles. Here, the energy optimization is the main purpose of the current work.

A detailed simulation model of an electrical traction chain of an electrically driven railway vehicle serves as the basic pillar for the investigations within this work. The simulation structure depicts a generic propulsion chain for various traction topologies. Here, both direct current topologies as well as alternating current structures can be evaluated. Based on desired timetables, an energy optimized trajectory planning is proposed for determining optimized speed profiles. These speed profiles serve as an input for a backward simulation structure, which delivers the resulting power characteristics of both single components as well as of the total traction topology. By balancing the power of all occurring power sources, the total energy consumption for the specific drive cycle is determined.

Beside the optimization of the driving strategy, the energy consumption of the vehicle can also be reduced by an intelligent adjustment of different operating strategies. As a degree of freedom, the parallel traction topology of the propulsion chain is considered to be utilized for energy optimization by separating the current load into different parallel traction components. Another possibility for energy savings is given by the implementation of an optimized operating strategy for on-board energy storage systems. For both, the operating strategy of the energy storage system as well as for the distribution of the load, heuristic approaches are presented. The energy optimal parameterization of these heuristics is the main objective of the implemented optimization strategies. As the three investigated strategies are affecting each other, the mutual correlations regarding the energy optimal solution are evaluated and an optimal combination is determined.

For the optimization of the three strategies – driving strategy, operating strategy of the ESS, load distribution between parallel traction topologies, a two-step optimization approach is proposed. Here, the positive characteristics of swarm-based optimization techniques are utilized, which allow for the detection and description of flat minima of the cost function. The combination of an intelligent model reduction and this two-step approach leads to a high accuracy of the optimization with a reasonable calculation effort.

The results of the operating strategies are evaluated for various examples of train categories. Thus, an assessment and analysis of the potential energy savings is possible for the different requirements and characteristics of a variety of service categories.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XV
Symbolverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	2
1.2 Zielstellung	5
1.3 Aufbau der Arbeit	6
1.4 Bewertung von Optimierungsmöglichkeiten für unterschiedliche Servicekategorien des Schienenverkehrs	8
2 Theoretische Grundlagen	11
2.1 Simulation von Energieverbräuchen für Antriebseinheiten	11
2.2 Grundlagen der Trajektorienplanung für Schienenfahrzeuge	15
2.3 Optimierung mittels schwarmbasierter Optimierungsalgorithmen	19
2.3.1 Grundlegender PSO-Algorithmus	20
2.3.2 Verhältnis von Exploration und Exploitation	21
2.3.3 Partikelbewegung an den Grenzen des Suchraums	22
2.4 Kurzdarstellung verwendeter Algorithmen	24
2.4.1 Bisektionsverfahren für die Bestimmung der Trajektorienparameter	24
2.4.2 Suche mittels Grey-Wolf-Optimierung	26
2.4.3 Suche mittels des Firefly-Algorithmus	28
2.5 Zweistufiges Optimierungsverfahren zur Berücksichtigung von Nebenbedingungen	29
2.5.1 Approximation der Nebenbedingungen durch eine flache Minimalstelle	30
2.5.2 Identifikation des eingeschränkten Parameterraums	34
3 Modellbildung und Simulation eines elektrischen Schienenfahrzeugs	39
3.1 Modellbildung und Simulation des Antriebsstrangs	41
3.2 Modellbildung und Simulation der Nebenaggregate	44
3.3 Modellbildung und Simulation des Energiespeichersystems	45
3.4 Modellreduktion für die Anwendung in der Optimierung	47
4 Energieoptimierung der Fahrstrategie	51
4.1 Zweistufiges Optimierungsverfahren für eine energieoptimale Fahrstrategie	53
4.2 Zusammenfassung Fahrstrategie	58
5 Energieoptimierung der Betriebsstrategie für elektrische Energiespeichersysteme	61
5.1 Die Betriebsstrategie für das Energiespeichersystem	62

5.2	Statische Betriebsstrategie für das Energiespeichersystem	64
5.2.1	Betrachtete Szenarien für statisches Energiespeicher-Management	65
5.2.2	Simulationsergebnisse für statisches Energiespeicher-Management	67
5.3	Dynamische Betriebsstrategie für das Energiespeichersystem	69
5.4	Dynamische Betriebsstrategie mit zusätzlicher Lademöglichkeit	76
5.5	Zusammenfassung Energiemanagement für elektrische Energiespeicher	79
6	Energieoptimale Lastpunktverteilung zwischen Antriebskomponenten	81
6.1	Betriebsstrategie zur Lastpunktverschiebung	82
6.2	Angepasste Simulationsstruktur zur Implementierung der Lastpunktverschiebung	85
6.3	Simulationsergebnisse für Lastpunktverschiebung	86
7	Wechselwirkung und Kombination von Fahr- und Betriebsstrategien	89
7.1	Wechselwirkung und Kombination von Lastverteilung und Fahrstrategie	90
7.2	Wechselwirkung und Kombination von Lastverteilung und ESS-Betriebsstrategie	93
8	Zusammenfassung und Ausblick	97
A	Ergänzende Simulationsergebnisse für die ESS-Betriebsstrategie	99
	Literaturverzeichnis	101