

## Diplomarbeit

Ermittlung von energieoptimalen Zuglauftrajektorien unter Berücksichtigung eines zugkraft-geschwindigkeitsabhängigen Motorwirkungsgrades

Evamarie Wießner

SS 2015

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. J. Krimmling

Betreuer: B. Jaekel

Dr.-Ing. M. Lehnert



### Motivation

Seit mehr als 40 Jahren beschäftigen sich Verkehrswissenschaftler mit dem Thema ressourcenschonender Fahrstrategien im Schienenverkehr. Viele Forschungsarbeiten basieren auf der Regel, dass eine energieoptimale Trajektorie aus den Phasen Beschleunigen mit maximal zur Verfügung stehender Zugkraft, Beharren, Auslaufen und Verzögern mit maximaler Bremskraft besteht. Diese Erkenntnis kann für ein einfaches Zugmodell aus dem Maximumprinzip von Pontryagin abgeleitet werden. Wird das Zugmodell, um die in einem Antriebssystem entstehenden zugkraft-geschwindigkeitsabhängigen Wirkungsgrade erweitert, ist die Anwendung dieses analytischen Ansatzes nur noch eingeschränkt möglich. Es ist deshalb ein auf dynamischer Programmierung basierendes numerisches Verfahren entwickelt worden. Die damit durchgeführten Untersuchungen erlauben einen Vergleich energieoptimaler Zuglauftrajektorien unter Einbezug eines konstanten bzw. variablen Wirkungsgradkennfelds. Anhand charakteristischer Szenarien können so Einsparpotentiale ermittelt und gegebenenfalls Handlungsempfehlungen hinsichtlich energieeffizienter Fahrstrategien abgeleitet werden.

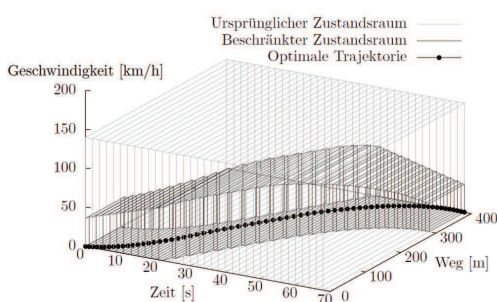


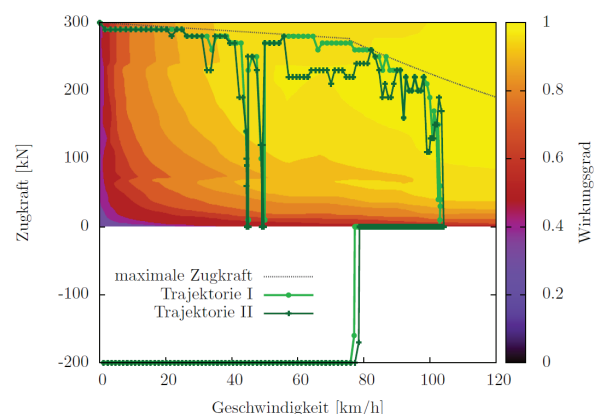
Abbildung 1: Angepasster Zustandsraum einer fiktiven Fahrt

### Anwendung dynamischer Programmierung

Grundlage des gewählten Optimierungsverfahrens ist die vollständige Diskretisierung des Zustandsraums, basierend auf der gegebenen Fahrzeit, der zurückzulegenden Strecke und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (Abbildung 1). Die Schrittweitenfestlegung innerhalb des Zustandsraums bedarf einer guten Abwägung zwischen erforderlicher Ergebnisqualität und dazu notwendigem Rechenaufwand.

### Ausgewählte Ergebnisse

Die untersuchten Szenarien weisen bei einem Vergleich energieoptimaler Fahrstrategien ein Einsparpotential zwischen knapp einem und sechs Prozent aufgrund der Einbeziehung eines variablen anstelle eines konstanten Wirkungsgradkennfelds auf. Besonderes Augenmerk ist dabei auf Betriebsweisen im hohen Geschwindigkeitsbereich sowie die Vermeidung von Beharrungsphasen zu legen (Abbildung 2). Es kann zudem festgehalten werden, dass das Einsparpotential mit steigender Fahrzeitreserve zunimmt.



	Trajektorie I	Trajektorie II
Energiebedarf [MJ]	349,7	345,3

Abbildung 2: Gegenüberstellung von energieoptimalen Zugkrafttrajektorien und deren Energiebedarf bei Berücksichtigung eines konstanten (Trajektorie I) und eines variablen Wirkungsgradkennfelds (Trajektorie II) auf einer ausgewählten Strecke

### Ausblick

Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Übertragung der ermittelten Fahrstrategien in den realen Betrieb. Dies bezieht sich sowohl auf die Umsetzbarkeit (Fahrschulungen, Fahrassistenzsysteme, Echtzeitfähigkeit) als auch auf die Beachtung des Fahrkomforts. Die Notwendigkeit weiterer Analysen besteht außerdem hinsichtlich der Energieeinsparmöglichkeiten in Abhängigkeit zugrunde liegender Fahrzeug- und Infrastrukturdaten.