

Diss. ETH No. 21522

NONCAUSAL AND CAUSAL OPTIMIZATION STRATEGIES FOR HYBRID ELECTRIC VEHICLES

A dissertation submitted to
ETH Zurich

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Philipp Elbert

MSc ETH in Mechanical Engineering
born June 22, 1982
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Lino Guzzella, examiner
Prof. Dr. Theo Hofman, co-examiner

2014

Abstract

The goal of this thesis is to provide numerical tools to systematically address both the optimal sizing and the control problem of hybrid electric buses. In this context, *sizing* refers to the choice of certain design parameters of the drivetrain, such as the nominal power of the engine, the nominal power of the electric machine, and the nominal energy capacity of the buffer. *Control* relates to the energy management problem, i.e., the decision of how to split the instantaneous power demanded by the driver between the engine and the energy buffer (e.g., battery or supercapacitor). Finally, *optimal* refers to the specific choice of component sizing variables and energy management control inputs that, when combined, globally minimize the fuel consumption of the bus driving along a certain bus line. This thesis focuses on the so-called *serial hybrid electric* or *Diesel-electric* drivetrain.

Part I of this thesis first introduces a mathematical vehicle model and then describes the numerical optimization of the energy management problem with the aim to find the global optimal solution to the problem using all the information that is available, i.e., causal as well as noncausal information. Despite the fact that, due to its noncausality, this globally optimal solution cannot be implemented on a vehicle, it represents an absolute measure that does not depend on any tuning parameters. Therefore, the globally optimal solution serves as a benchmark that allows the potential of a given vehicle design or online energy management to be measured in an objective manner. Two methods are investigated, specifically dynamic programming and convex optimization.

Part II of this thesis describes the development and implementation of a real-time energy management controller whose performance may be termed optimal in the stochastic sense. The control design task is addressed by stochastic dynamic programming that allows a systematic design procedure and facilitates the tuning process required to tune the controller to a behavior that is acceptable in a city bus, e.g., avoiding high

noise levels at bus stops or engine shut-offs when the engine is cold. The design methodology is very user friendly, and the resulting controller achieves a close-to-optimal performance on flat inner city bus lines in a practical test. Furthermore, the procedure allows the investigation of the optimal tradeoff between contradicting objectives, such as fuel economy and drivability. In order to reduce any sensitivity towards variations in the type of driving mission, an extension to the baseline controller is developed that takes into account information specific to the bus line, such as the distance to the next stop and the future altitude profile of the bus line. Together with this predictive extension, the baseline controller delivers close-to-optimal results on a hilly bus line as well.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung systematischer Methoden zur optimalen Dimensionierung von Antriebskomponenten sowie der Entwicklung eines optimalen Energiemanagements für Busse mit seriellem Hybridantrieb. Dimensioniert werden bestimmte Designparameter, wie die nominellen Leistungswerte des Verbrennungs- und des Elektromotors, sowie die Energiespeicherkapazität des elektrischen Speichers (Batterie oder Superkondensator). Mithilfe des Energiemanagements wird die *Lastenaufteilung* bestimmt, d.h., wie die vom Fahrer nachgefragte Leistung zwischen dem elektrischen Energiespeicher und dem Verbrennungsmotor aufgeteilt wird. Die optimale Dimensionierung ist diejenige Kombination von Designparametern und Energiemanagement, welche zusammengenommen eine gewisse Zielfunktion minimieren (z.B. den Treibstoffverbrauch auf einer gewissen Fahrstrecke). Im Zentrum der Betrachtungen steht der *serielle* oder auch *Diesel-elektrische* Hybridantrieb.

Teil I dieser Arbeit bezieht sich auf die numerische Optimierung des Energiemanagements mit dem Ziel, die global optimale Lösung zu finden, wenn nötig unter Berücksichtigung aller verfügbaren Informationen einschliesslich nicht-kausaler Information. Ein solches Energiemanagement kann zwar nicht auf dem Fahrzeug eingesetzt werden, jedoch stellt seine Performance eine absolute Grösse dar, die es erlaubt, verschiedene Auslegungen des Antriebssystems oder des Energiemanagement-Reglers objektiv miteinander zu vergleichen. Zu diesem Zweck werden im ersten Teil der Arbeit zwei Methoden untersucht: die Dynamische Programmierung und die Konvexe Optimierung.

Teil II dieser Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Energiemanagement-Reglers für den Einsatz auf dem Fahrzeug. Der Regler minimiert den Treibstoffverbrauch im stochastischen Sinne. Zur Reglerauslegung wurde die stochastische Dynamische Programmierung verwendet. Diese erlaubt eine systematische Reglerauslegung unter Berücksichtigung weiterer Performance-Merkmale, die im Stadtbus nicht vernachlässigt werden

dürfen, z.B. das Vermeiden von hohen Geräuschpegeln an Haltestellen oder das Verhindern eines Start/Stop-Betriebs des Dieselmotors bei niedrigen Betriebstemperaturen. Diese Methode der Reglerauslegung ist benutzerfreundlich und erreicht im Praxistest ein quasi-optimale Performance auf flachen, innerstädtischen Buslinien. Um auch auf hügeligen Linien optimale Verbrauchswerte zu erzielen, wurde eine Erweiterung des Basis-Energiemanagements entwickelt, welche streckenspezifische Informationen berücksichtigt, z.B., die Distanz bis zur nächsten Haltestelle und das Höhenprofil des weiteren Streckenverlaufs. Zusammen mit dieser prädiktiven Erweiterung erreicht der Energiemanagement-Regler auch auf hügeligen, anspruchsvollen Strecken quasi-optimale Verbrauchswerte.