

Florian Uhrig

## **Bewertung von effizienzsteigernden Maßnahmen mit der verschachtelten Optimierung für automobiler Brennstoffzellenantriebe**

Bewertung von effizienzsteigernden Maßnahmen mit der verschachtelten Optimierung für  
automobile Brennstoffzellenantriebe

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.-Ing.

vorgelegt

der Fakultät für Maschinenbau der  
Technischen Universität Chemnitz

von M.Sc. Florian Uhrig

geboren am 29.05.1991 in Coburg

Chemnitz, den 12.12.2019



Berichte aus der Fahrzeugtechnik

**Florian Uhrig**

**Bewertung von effizienzsteigernden Maßnahmen  
mit der verschachtelten Optimierung für  
automobile Brennstoffzellenantriebe**

D 93 (Diss. TU Chemnitz)

Shaker Verlag  
Düren 2020

### **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.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7643-1

ISSN 0945-0742

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Für meine Eltern. Meine ersten Lehrer.

*„Ich glaube an das Pferd.  
Das Automobil ist eine vorübergehende Erscheinung.“*

Wilhelm II. (1859 – 1941)



## **Kurzfassung**

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Maßnahmen zur Effizienzsteigerung von automobilen Brennstoffzellenfahrzeugen veröffentlicht. In dieser Arbeit werden Energieeinsparpotentiale bei gleichzeitiger Anwendung mehrerer Maßnahmen auf einen Brennstoffzellenantriebsstrang über einen Zyklus bewertet. Zur Reduktion der Maschinenverluste wird die variable Zwischenkreisspannung betrachtet. Die aktive Phasenschaltung steigert die Effizienz der Gleichspannungswandler. Aufgrund der Komplexität von Brennstoffzellenantriebssträngen mit unterschiedlichen Hochvolttopologien und Hybridisierungsgraden muss für die Bewertung die verschachtelte Optimierung herangezogen werden. Dabei werden im Rahmen der Betriebsstrategie alle Subsysteme optimal auf die Anforderungen angepasst, um ein globales Minimum des Energiebedarfs zur Bewältigung eines Fahrzyklus zu erzielen. Zur Berechnung der Betriebsstrategie wird das Pontryagin's Minimum Principle und die Dynamische Programmierung herangezogen. Um fluktuierende Leistungsanforderungen an das Brennstoffzellensystem zu unterbinden, wird die Dynamische Programmierung um die Berücksichtigung des Brennstoffzellensystemzustands erweitert. Die daraus resultierende Betriebsstrategie reduziert die Anzahl der Ein- und Ausschaltvorgänge des Brennstoffzellensystems für einen Hybridisierungsgrad von 0,7 und einer Hochvolttopologie mit zwei Gleichspannungswandler um 48 % während der Energieverbrauch lediglich um 1,2 % ansteigt. Dabei resultiert aus der variablen Zwischenkreisspannung das Energieeinsparpotential von 1,7 % und für die aktive Phasenschaltung in den Gleichspannungswandlern von 0,3 % über den Fahrzyklus. Entsprechend der Leistungsanforderung an das Brennstoffzellensystem wird anschließend die Auslegung der Strömungsmaschinen angepasst, um so den Brennstoffzellensystemwirkungsgrad im Teillastbereich um 1 % zu steigern. Bei maximaler Leistung des Brennstoffzellensystems kann die parasitäre Leistung der Luftversorgung durch eine Stufenaufladung nochmals um 20 % gesenkt werden. Abschließend werden anhand von Sankey-Diagrammen die Änderungen in den Energieflüssen des Brennstoffzellenantriebsstrangs durch die verschachtelte Optimierung und durch die effizienzsteigernden Maßnahmen dargestellt.

## **Abstract**

In recent years, numerous measures to increase the efficiency of automotive fuel cell powertrains have been published. This dissertation evaluates the energy saving potentials of several measures for a fuel cell vehicle with a driving cycle. To reduce machine losses, the variable DC-link voltage is considered. The active phase circuit increases the efficiency of the DC-DC converters. Due to the complexity of fuel cell powertrains with different high-voltage topologies and hybridization degrees, nested optimization is used for the evaluation. Within the framework of the operating strategy, all subsystems must be optimally adapted to the requirements in order to achieve a global minimum of the energy consumption required for the driving cycle. The Pontryagin's Minimum Principle and Dynamic Programming are used to calculate the operating strategy. To avoid fluctuating power requirements on the fuel cell system, the Dynamic Programming is extended by the consideration of the fuel cell system state. The resulting operating strategy reduces the startup and shut-down events of the fuel cell system by 48 % for a hybridization level of 0.7 and a high-voltage topology with two DC-DC converters, while energy consumption increases by only 1.2 %. The energy saving potential of the variable DC link voltage is 1.7 % and for the active phase switching in the DC-DC converters is 0.3 % over the driving cycle. Based on the power requirement of the fuel cell system, the design of the turbomachinery is then adapted to increase the fuel cell system efficiency in the partial load range by 1 %. At maximum power of the fuel cell system, the serial booster reduces the parasitic load of the air supply by 20 %. Finally, Sankey diagrams explain the adjustments in the energy flows of the fuel cell powertrain through nested optimization and efficiency enhancing measures.

## **Danksagung**

Liebe Leserinnen und Leser,

die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Continental Automotive GmbH in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Alternative Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Chemnitz.

Bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Thomas von Unwerth bedanke ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen und für die Betreuung der Dissertation, wodurch diese Arbeit erst ermöglicht wurde. Großen Dank möchte ich auch Prof. Dr. Peter Kurzweil für die fachliche Unterstützung und für die Übernahme des Korreferats aussprechen.

Besonders gefreut hat mich die kooperative und die freundliche Atmosphäre in der Abteilung Technology & Innovation der Continental Automotive GmbH. Ein besonderes Dankeschön geht an Qi Tian, der mir mit einer Masterthesis den Einstieg in die automobilen Forschung ermöglichte und anschließend den Weg zur Promotion ebnete. Andreas Heinrich, Thomas Knorr, Dr. Martin Brüll und Dr. Oliver Maiwald möchte ich für die konstruktive Unterstützung danken. Meinen Kollegen möchte ich für die fachliche als auch persönliche Bereicherung meinen Dank aussprechen.

Den Mitarbeitern des Lehrstuhls Alternative Fahrzeugantriebe möchte ich für das partnerschaftliche Miteinander danken. Meine große Anerkennung verdienen vor allem Vladimir Buday und Peter Schwotzer-Uhlig für Ihren unermüdlichen Einsatz und der mannigfachen Ideengebung bei der Bereitstellung der Infrastruktur und bei dem Aufbau von Prüfständen.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern, Marianne Uhrig und Martin Lapp-Uhrig. Sie haben mir das Leben geschenkt und mich anschließend mit liebevollem Verständnis und beständiger Geduld in allen Lebenslagen unterstützt. Großer Dank und meine tiefe Verbundenheit gebührt meiner Freundin, Ines Großhauser, für den menschlichen Rückhalt und für ihr Verständnis bei der Anfertigung dieser Dissertation. Mein Bruder, Felix Uhrig, unterstützte mich durch zahlreiche konstruktive Diskussionen und differenzierte Anmerkungen. Abschließend möchte ich mich bei meinen Freunden und der restlichen Familie bedanken, dass sie immer für mich da waren, sind und sein werden.

Florian Uhrig

Regensburg, im Juli 2020

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Grundlagen des Brennstoffzellenantriebsstrangs .....	4
2.1	Traktionsmaschine .....	4
2.2	Wechselrichter .....	8
2.3	Gleichspannungswandler .....	11
2.4	Batterie.....	15
2.5	Brennstoffzellensystem.....	19
2.5.1	Brennstoffzelle als Energiewandler.....	19
2.5.2	Aufbau und Funktionsweise .....	20
2.5.3	Thermodynamik der PEMFC .....	22
2.5.4	Die Brennstoffzellenperipherie .....	26
2.5.5	Brennstoffzellensystemsteuerung.....	36
2.6	Antriebsstrangmanagement .....	38
3	Simulationsmodell des Brennstoffzellenantriebsstrangs .....	41
3.1	Modellierung des Antriebsstrangs .....	41
3.2	Fahrzyklen .....	42
3.3	Fahrzeugdynamik .....	43
3.4	Antriebsstrangtopologien.....	47
3.5	Optimierungspotentiale der Antriebstopologien.....	50
3.6	Optimierung des Antriebsstrangs .....	53
4	Optimale Betriebsstrategie .....	56
4.1	Pontryagin's Minimumprinzip.....	56
4.2	Dynamische Programmierung .....	63
4.3	Vergleich der Antriebsstrangtopologien.....	67
4.4	Berücksichtigung der Systemzustände durch die Dynamische Programmierung .....	70
4.5	Abgeleitete Betriebsstrategie .....	77
4.6	Bewertung der Optimierungspotentiale .....	80
5	Simulationsmodell des Brennstoffzellensystems .....	81
5.1	Modellierung der Luftversorgung.....	82

5.1.1	Abbildung der Gasdynamik.....	83
5.1.2	Abbilden von Strömungsmaschinen.....	87
5.2	Abbildung des Brennstoffzellenstapels .....	96
5.2.1	Charakterisierung des Brennstoffzellenstapels.....	97
5.2.2	Elektrisches Ersatzschaltbild.....	102
5.3	Simulation der Luftversorgung.....	106
6	Optimierung der Luftversorgung.....	109
6.1	Partikel-Schwarm-Algorithmus.....	110
6.2	Evolutionärer Algorithmus .....	112
6.3	Untersuchung der Luftsysteme .....	114
6.4	Sensitivitätsanalyse der Turbomaschinendimensionierung .....	116
6.5	Dimensionierung der Luftversorgung zur Steigerung der Systemeffizienz.....	119
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	121
Verzeichnisse .....		127
Abkürzungs- und Formelverzeichnis.....		127
Abbildungsverzeichnis .....		137
Tabellenverzeichnis .....		142
Literaturverzeichnis .....		143