Schriftenreihe
des Instituts für
Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Nr: 58

M.Eng.
Jan Peter Minnrich
2018

Alternatives Range Extender-Konzept für das Thermo- und Energie-management von Elektrofahrzeugen

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

Alternatives Range Extender-Konzept für das Thermo- und Energiemanagement von Elektrofahrzeugen

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von:	Jan Peter Minnrich
aus (Geburtsort):	Hildesheim

eingereicht am:	22.05.2017
mündliche Prüfung am:	13.12.2017
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay Prof. Dr.-Ing. L.-O. Gusig

2018

Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Band 58

Jan Peter Minnrich

Alternatives Range Extender-Konzept für das Thermo- und Energiemanagement von Elektrofahrzeugen

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5751-5
ISSN 1619-6325

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Stipendiat des kooperativen Promotionsprogramms Elektromobilität am Instituts für Konstruktionselemente, Mechatronik und Elektromobilität (IKME) der Hochschule Hannover und in Zusammenarbeit mit dem Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) der Technischen Universität Braunschweig.

Sie wurde von Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay, dem Leiter des IfF der TU Braunschweig und Herrn Prof. Dr.-Ing. Lars-Oliver Gusig, dem Leiter des IKME der HS Hannover betreut und begutachtet. Die aktive Unterstützung, persönliche Förderung sowie fachliche Diskussion des Themas über die gesamte Zeit hinweg trugen maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei, wofür ich mich ausdrücklich bedanken möchte.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, dem Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen der TU Braunschweig für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Allen aktiven und ehemaligen Kollegen des IKME und IfF möchte ich für die Unterstützung, Hilfsbereitschaft und Zusammenarbeit während meiner Promotionszeit danken. Ein besonderer Dank geht insbesondere an meine beiden direkten Kollegen Henrik Rüscher und Christian Schmicke.

Ein großer Dank geht auch an meine Familie, die mich auf allen Stationen meines Lebensweges stets unterstützt haben.

Hildesheim, Dezember 2017 *Jan Peter Minnrich*

Alternatives Range Extender-Konzept für das Thermo- und Energiemanagement von Elektrofahrzeugen

von Jan Peter Minnrich

Kurzfassung

Um batterieelektrische Fahrzeuge für Kunden attraktiver zu gestalten, muss die Reichweite verbessert und unabhängig von klimatischen Umgebungsbedingungen sichergestellt sein. Aktuell muss der Kunde insbesondere bei kalten Witterungen starke Reichweiteneinbußen in Kauf nehmen, da ein Großteil der Batterieenergie zum Heizen des E-Fahrzeugs verwendet werden muss. Gerade bei kurzen Fahrstrecken ist der thermische Energiebedarf zum Aufheizen des Fahrzeugs im Vergleich zur Antriebsenergie sehr hoch und kann bis zu 50 % Reichweiteneinbußen zur Folge haben.

Range Extender sind verbrennungsmotorische Zusatzaggregate, die in E-Fahrzeuge integriert werden, um zusätzlich elektrische Energie zu erzeugen und somit die Reichweite über die Batteriereichweite hinaus zu erweitern. Diese Systeme sind aktuell auf elektrische Leistungen von über 15 kW ausgelegt. Sie weisen eine Masse von über 100 kg auf und erzeugen damit einen unerwünschten Mehrverbrauch von 4 – 8 %.

In dieser Arbeit wird ein alternatives Range Extender-Konzept namens *mobiles mikro-Blockheizkraftwerk (mmBHKW)* vorgestellt, welches die Reichweite eines E-Fahrzeugs auch mit sehr kleinen elektrischen Leistungen (< 5 kW) verbessert und einen höheren Gesamtwirkungsgrad erreicht. Die Besonderheit des mmBHKWs liegt in der Nutzung der Abwärme der VKM, um z. B. den Fahrgastinnenraum oder die Batterie zu temperieren. Als Ergebnis wird gezeigt, dass das neue Konzept nicht nur einen Reichweitenvorteil bietet, sondern auch den Komfort im Winter verbessern kann, ohne dabei mehr CO_2-Emissionen als ein herkömmliches E-Fahrzeug über den Strommix in Deutschland zu erzeugen. Das System ist leichter und generiert im ungenutzten Zustand einen Mehrverbrauch der Gesamtenergie von nur 2 – 3 %.

Der Neuheitswert der Arbeit bezieht sich hierbei auf die Entwicklung einer Auslegungsmethodik anhand des thermischen Energiebedarfs des E-Fahrzeugs unter Berücksichtigung des Kundenbetriebs. Dabei wird auf die etablierte Methode des 3F-Parameterraums zurückgegriffen. Diese wird um einen Optimierungsansatz hinsichtlich Reichweite, Komfort und CO_2-Emissionen erweitert und beispielhaft auf ein Kompaktklassefahrzeug (C-Segment) angewendet. Ein Ergebnis ist, dass insbesondere Stadtstreckenfahrer und Kunden, die das E-Fahrzeug als Zweitwagen nutzen, von diesem Konzept profitieren und Zusatzreichweiten von teilweise über 100 % erreichen. Die Arbeit diskutiert technische Vor- und Nachteile sowie Chancen und Risiken des Konzepts im Kundenbetrieb, die als Grundlage für weitere Entwicklungen genutzt werden können.

Alternative Range Extender Concept for Thermal- and Energy Management of Electric Vehicles

by Jan Peter Minnrich

Abstract

The driving range has to be improved and independence from climatic environmental conditions has to be ensured in order to make battery electric vehicles more affordable and attractive to private customers. Particularly in winter the driving range decreases due to a part of the battery capacity is being used for heating the passenger compartment. Especially for short distances the driving range decreases down to 50 %, because the energy used for heating is very high compared to the driving energy.

State of the art range extenders consist of a combustion engine coupled to a generator which generates electric energy in order to charge the battery and extend the range of the battery electric vehicle. These systems are currently designed for electric outputs of more than 15 kW and generate an additional consumption of up to 8 % due to the high weight (over 100 kg).

This thesis presents an alternative range extender concept called *mobile micro-combined heat and power unit (mmCHP unit)*, which improves the range of a battery electric vehicle in a power class below 5 kW and achieves a higher overall efficiency. The special feature of the mmCHP unit is the use of the waste heat from the internal combustion engine for e. g. the temperature control of the passenger compartment or the battery. As a result, it is shown that the new concept not only offers a range extension, but can also improve a higher winter comfort without generating more CO_2-emissions in comparison to a conventional electric vehicle based on the electricity mix in Germany. Furthermore, this concept has a lower weight and generates lower additional consumption (only up to 2 – 3 %) compared to a state of the art range extender.

The novelty of this thesis is the development of a methodology, which calculates the optimal power range for a mmCHP unit. This new methodology is based on the thermal energy demand of the electric vehicle taking customer use into account. Within this context the established method of the 3D parameter space is used. This method is extended by an optimization approach regarding the three parameters range, comfort and CO_2-emissions and applied to a compact class vehicle (c-segment). One result is that urban drivers and customers who use the BEV as a second car benefit from this new concept in that the range is extended more than 100 % in comparison to a BEV without mmBHKW unit. This thesis discusses technical advantages and disadvantages as well as opportunities and risks of the mmCHP unit concept in customer's use. The results can be a basis for further developments.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen ..... **iii**

1 Einführung in die Thematik **1**

1.1 Motivation und Zielsetzung 3

1.2 Vorgehensweise und Methodik 4

1.3 Aufbau und Inhalt der Arbeit 5

2 Stand der Wissenschaft **6**

2.1 Thermo- und Energiemanagement in E-Fahrzeugen 6

2.1.1 Antriebsstrang 8

2.1.2 Batterie 8

2.1.3 Fahrgastinnenraum 9

2.2 E-Fahrzeuge mit Range Extender 12

2.2.1 Anforderungen an Fahrzeugkonzepte 12

2.2.2 Fahrzeugkonzepte im Überblick 14

2.2.3 Range Extender-Konzepte 17

2.3 Alternative Range Extender Konzepte 22

2.4 Simulation und Optimierung von E-Fahrzeugen 27

2.5 Synthese zum Stand der Wissenschaft 28

3 Repräsentativer Kundenbetrieb **29**

3.1 3F-Methodik 29

3.2 Repräsentativer Kundenbetrieb von mobilen mikro-BHKWs 31

3.2.1 Antriebsenergie 31

3.2.2 Thermische Energie 34

3.2.3 Thermischer und antriebsrelevanter 3F-Parameterraum 37

4 Modellbildung des mobilen mikro-BHKWs im E-Fahrzeug **39**

4.1 Fahrzeugmodell 39

4.1.1 Fahrzeuglängsdynamik 40

4.1.2 E-Motor und Leistungselektronik 43

4.1.3 Batterie 43

4.1.4 Fahrgastinnenraum und Heizsystem 45

4.2 Mobiles mikro-BHKW ... 50
4.2.1 Systemkennparameter ... 50
4.2.2 Einzelkomponenten ... 52
4.2.3 Gesamtsystem ... 60
4.3 Betriebsstrategien des mobilen mikro-BHKWs ... 66
4.3.1 Startstrategie ... 66
4.3.2 Betriebsstrategien ... 68

5 Leistungsauslegung eines mobilen mikro-BHKWs ... 71
5.1 Darstellung der Auslegungskennparameter ... 72
5.1.1 Reichweite ... 72
5.1.2 Emissionen ... 74
5.1.3 Komfort ... 78
5.2 Analyse der Auslegungskennparameter ... 80
5.2.1 Zeitverhalten der Kennparameter ... 80
5.2.2 Einfluss durch Leistungsskalierung des mmBHKWs ... 81
5.2.3 Einfluss durch Leistungsskalierung des Heizsystems ... 85
5.3 Multikriterielle Leistungsauslegung ... 88
5.3.1 Grundlagen zur Versuchsplanung und Optimierung ... 88
5.3.2 Methodik zur multikriteriellen Leistungsauslegung ... 91

6 Mobiles mikro-BHKW in der Kundenanwendung ... 99
6.1 Simulationsergebnisse ... 99
6.1.1 Leistungsauslegung des mmBHKWs ... 99
6.1.2 Kennparameter der Kundenanwendung ... 105
6.2 Sensitivitätsanalyse und Optimierungsansätze ... 114
6.2.1 Einflüsse auf das Zeitverhalten des mobilen mikro-BHKWs ... 114
6.2.2 Einflüsse auf die Effizienzanforderung ... 118
6.2.3 Optimierungspotenziale durch die Betriebsstrategie ... 120
6.3 Zusammenfassung ... 120

7 Evaluation und Einordnung der Ergebnisse ... 123
7.1 Technologievergleich ... 123
7.2 Diskussion der Ergebnisse ... 129

8 Zusammenfassung ... 133

Literaturverzeichnis ... 135

Anhang ... 146