

Sören Scherler

Zeit- und energieoptimierter Fahrbetrieb eines Elektrofahrzeugs mit Brennstoffzellen-Range-Extender im digital vernetzten Verkehr

Zeit- und energieoptimierter Fahrbetrieb eines Elektrofahrzeugs mit Brennstoffzellen-Range-Extender im digital vernetzten Verkehr

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von Sören Scherler, M.Eng.
aus Wolfenbüttel

Eingereicht am: 15. August 2022

Mündliche Prüfung am: 09. Dezember 2022

Vorsitz der Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel (TU Braunschweig)

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Markus Henke (TU Braunschweig)

2. Referentin: Prof. Dr.-Ing. Xiaobo Liu-Henke (Ostfalia Hochschule)

3. Referent: Prof. Dr.-Ing. Burghard Voß (BTU Cottbus-Senftenberg)

Druckjahr: 2022

Berichte aus der Fahrzeugtechnik

Sören Scherler

**Zeit- und energieoptimierter Fahrbetrieb eines
Elektrofahrzeugs mit Brennstoffzellen-Range-
Extender im digital vernetzten Verkehr**

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2022

Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig,
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik

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 978-3-8440-8915-8

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 • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der *Fachgruppe Regelungstechnik und Fahrzeugmechatronik* an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften im Rahmen des vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) und der VolkswagenStiftung geförderten Verbundprojekts *Zukünftige Fahrzeugtechnologien im Open Region Lab (ZuFOR)*.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Henke, Leiter des *Instituts für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen* der TU Braunschweig, danke ich vielmals für die intensive Betreuung dieser Arbeit. Die stetige Unterstützung meiner Forschungsarbeit und das tiefgreifende Interesse an dieser trugen einen erheblichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit bei.

Ich danke Frau Prof. Dr.-Ing. Xiaobo Liu-Henke, Leiterin der Fachgruppe *Regelungstechnik und Fahrzeugmechatronik* an der Ostfalia, herzlich für die Ermöglichung dieser Arbeit. Aus vielen langen und tiefgehenden Diskussionen eröffneten sich Fragestellungen, die in dieser Arbeit beantwortet werden konnten. Das in mich gesetzte Vertrauen in schwierigen Phasen half mir, das Ziel nicht aus den Augen zu verlieren.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Burghard Voß, Inhaber des Lehrstuhls *Fahrzeugtechnik und -antriebe* der BTU Cottbus-Senftenberg, möchte ich meinen Dank für die Erstellung des dritten Gutachtens aussprechen. Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel vom *Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme* der TU Braunschweig für die Übernahme des Promotionskommissionsvorsitzes.

Ich bedanke mich bei allen Kollegen und Projektpartnern, die mich während meiner Zeit an der Ostfalia begleitet haben, für eine kreative, konstruktive und lehrreiche Zeit sowie das freundschaftliche Arbeitsklima. Hervorzuheben ist Herr Dr.-Ing. Florian Quantmeyer, der mich entscheidend zur wissenschaftlichen Arbeit an der Hochschule ermutigte. Ein weiterer Dank gebührt den Studierenden, die ich während ihres Studiums betreuen und begleiten durfte.

Der größte Dank allerdings gebührt meiner Frau Jacqueline für ihren unerschütterlichen Rückhalt und die geduldige Unterstützung in allen Phasen dieser Arbeit. Sie hat mich stets bestärkt und damit maßgeblich zum Erfolg dieses Vorhabens beigetragen.

Abschließend in dieser Aufzählung sei meine Tochter Charlotte genannt. Mit ihrer unbeschwerten, fröhlichen Art lässt sie alle Beschwerlichkeiten nebensächlich werden und hat so v. a. in der Endphase dieser Arbeit stets Motivation gestiftet.

Braunschweig, im August 2022
Sören Scherler

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Angenommene technologische Rahmenbedingungen dieser Arbeit . .	2
1.3 Ziele und Aufbau dieser Arbeit	4
2 Stand des Wissens	7
2.1 Elektrisches Energiemanagement für Hybridfahrzeuge	7
2.1.1 Klassifikation von Ansätzen des Energiemanagements	7
2.1.2 Heuristisches Energiemanagement	8
2.1.3 Optimierungsbasiertes Energiemanagement	11
2.1.4 Lernbasiertes Energiemanagement	13
2.1.5 Prädiktives Energiemanagement	13
2.1.6 Zwischenfazit und Bewertung	16
2.2 Zielführung und Bahnplanung in digital vernetzten Verkehrssystemen	17
2.2.1 Vernetzte Verkehrssysteme	17
2.2.2 Klassifikation von Ansätzen zur Zielführung und Bahnplanung	20
2.2.3 Zielführung ohne Zwischenziele	20
2.2.4 Zielführung mit Zwischenzielen	25
2.2.5 Bahnplanung	27
2.2.6 Zwischenfazit und Bewertung	29
2.3 Mechatronische Entwicklungsmethodik	30
2.3.1 Mechatronische Strukturierung	30
2.3.2 Mechatronischer Entwicklungskreislauf	31
2.3.3 Modellbildung und Systemidentifikation	32
2.3.4 Anwendung der Methodik in dieser Arbeit	34
2.4 Bewertung des „Stand des Wissens“ im Hinblick auf diese Arbeit . .	34
3 Konzeption der Funktionen für den energieoptimierten Fahrbetrieb	37
3.1 Definition von Anforderungen	37
3.1.1 Anforderungen auf Bordnetzebene	37
3.1.2 Anforderungen im Kontext digital vernetzter Verkehrssysteme	39
3.2 Konzeption einer modularen und hierarchisch angeordneten Systemstruktur	40
3.2.1 Modulare und hierarchisch angeordnete Systemstruktur des Gesamtfahrzeugs im vernetzten Verkehrssystem	41
3.2.2 Funktionsstruktur auf AMS-Ebene	42
3.2.3 Funktionsstruktur der MFG des prädiktiven Energiemanagements	44

4	CAE-Entwicklungswerkzeuge	46
4.1	Virtueller MiL- und SiL-Prüfstand	46
4.1.1	Konzept des virtuellen Prüfstands	46
4.1.2	Modellkomponenten	48
4.2	Flexibel konfigurierbarer HiL-Prüfstand	50
4.2.1	Konzept des HiL-Prüfstands	50
4.2.2	Realisierung des flexibel konfigurierbaren HiL-Prüfstands	52
4.3	Mobiler V2X-HiL-Prüfstand	55
4.3.1	Konzept des mobilen V2X-HiL-Prüfstands	55
4.3.2	Realisierung des mobilen V2X-HiL-Prüfstands	56
4.4	Einsatz der CAE-Werkzeuge in dieser Arbeit und Zwischenfazit	58
5	Entwurf von Zielführung und Bahnplanung in vernetzten Verkehrssystemen	59
5.1	Konzept der Zielführung und Bahnplanung in vernetzten Verkehrssystemen	59
5.2	Entwurf der Zielführung	61
5.2.1	Aufbereitung und Bereitstellung des statischen Kartenmaterials	61
5.2.2	Kartenaktualisierung durch dynamische Verkehrsinformationen	71
5.2.3	Auslegung der zeit-, distanz- und energieoptimierten Zielführung	72
5.2.4	Erweiterung zur infrastruktureoptimierten Zielführung	76
5.3	Entwurf der Bahnplanung	85
5.3.1	Definition des Optimierungsproblems und des Lösungsraums	85
5.3.2	Entwurf des Optimierungsverfahrens zur Bahnplanung	90
5.4	Zwischenfazit	92
6	Entwurf des prädiktiven Energiemanagements	93
6.1	Konzept des prädiktiven Energiemanagements	93
6.2	Brennstoffzellenmanagement	95
6.2.1	Elektrochemische Grundlagen von PEM-Brennstoffzellen	95
6.2.2	Funktionen des Brennstoffzellenmanagements	96
6.3	Batteriemanagement	98
6.3.1	Funktionsprinzip und Aufbau von Lithium-Ionen-Batterien	98
6.3.2	Funktionen des Batteriemagements	99
6.4	Bordnetzmanagement	100
6.4.1	Modellbildung des Bordnetzes	100
6.4.2	Funktion des Bordnetzmanagements	103
6.5	Entwurf der Leistungsprädiktion	105
6.5.1	Konzept der Leistungsprädiktion	106
6.5.2	Prädiktion der Antriebsleistung	107
6.5.3	Prädiktion der Leistungen im Bordnetz	108
6.5.4	Prädiktion der Gesamtleistung	109
6.6	Entwurf der modellprädiktiven Leistungsbereitstellung	109
6.6.1	Modellbildung der Brennstoffzelle	109
6.6.2	Modellbildung der Lithium-Ionen-Batterie	116
6.6.3	Methode der Modellprädiktiven Regelung	121
6.6.4	Systembeschreibung im zeitdiskreten Zustandsraum	125
6.6.5	Auslegung einer nichtlinearen, zeitlich kaskadierten Regelung	126
6.7	Zwischenfazit	134

7	Verifikation der Funktionen für den energieoptimierten Fahrbetrieb	135
7.1	Verifikation mittels MiL- und SiL-Simulation	135
7.1.1	Definition der Pilotanwendung	135
7.1.2	Verifikation der Zielführung	136
7.1.3	Verifikation der Bahnplanung	138
7.1.4	Verifikation des prädiktiven Energiemanagements	140
7.2	Verifikation unter Echtzeitbedingungen mittels HiL-Simulation . . .	143
7.2.1	Verifikation der Zielführung unter Echtzeitbedingungen . . .	143
7.2.2	Verifikation des prädiktiven Energiemanagements	147
7.3	Zwischenfazit	149
8	Zusammenfassung und Ausblick	151
8.1	Zusammenfassung	151
8.2	Ausblick	153
A	Referenzen	156
A.1	Literaturverzeichnis	156
A.2	Eigene Publikationen	167
B	Anhang	171
B.1	Zielführung und Bahnplanung in vernetzten Verkehrssystemen . . .	171
B.1.1	Bellman-Ford-Algorithmus	171
B.1.2	Funktionsarchitektur zur Realisierung der dynamischen Kartenaktualisierung	175
B.1.3	Funktionsarchitektur zur Realisierung der Zielführung	176
B.1.4	Funktionsarchitektur zur Realisierung der Ermittlung eines Infrastrukturgraphen	179
B.1.5	Funktionsarchitektur zur Realisierung der infrastrukturopptimierten Zielführung	180
B.2	Entwurf des prädiktiven Energiemanagements	182
B.2.1	Brennstoffzellentypen	182
B.2.2	Bordnetzkomponenten	183
B.2.3	Leistungsmatrix des NV-Leistungskordinators	183