



Entwurf und Betrieb hybrid-elektrischer Fahrzeugantriebe am Beispiel von Abfallsammelfahrzeugen

Zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORINGENIEUR (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik
der Universität Paderborn
genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Tobias Knoke
Frohnhausen

Referent: Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker
Korreferent: Prof. Dr. Michael Dellnitz

Tag der mündlichen Prüfung: 16.11.2010

Paderborn, den 05.12.2010

Diss. EIM-E/271

Berichte aus dem Fachgebiet Leistungselektronik und
Elektrische Antriebstechnik

Band 2

Tobias Knoke

**Entwurf und Betrieb hybrid-elektrischer Fahrzeug-
antriebe am Beispiel von Abfallsammelfahrzeugen**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2011

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9762-6

ISSN 1862-3492

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

Vorwort

Es ist guter Brauch an dieser Stelle den zahlreichen Menschen zu danken, ohne die das Anfertigen einer solchen Arbeit nicht möglich wäre.

So danke ich insbesondere Prof. Dr.-Ing. J. Böcker, dem Leiter des Fachgebiets Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik der Universität Paderborn, an dem ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig war, für die Möglichkeit diese Arbeit anzufertigen, die stete Förderung und Betreuung sowie für die Begutachtung.

Auch danke ich Prof. Dr. M. Delnitz für die Bereitschaft das Korreferat zu übernehmen und für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse.

Bedanken möchte ich mich bei Herrn J. Henning vom Abfallentsorgungs- und Stadtreinigungsbetrieb Paderborn (ASP) für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit und bei Herrn M. Koch für den Hinweis auf das interessante Potenzial hybrid-elektrischer Abfallsammelfahrzeuge.

Bei den ehemaligen Kollegen des obengenannten Fachgebiets bedanke ich mich für die sehr schöne Zeit, die durch ein vorzügliches Arbeitsklima und eine stete Hilfsbereitschaft geprägt war. Besonderer Dank gilt hier Herrn Dipl.-Ing. C. Romaus für die zahlreichen Anregungen und Verbesserungsvorschläge zu dieser Arbeit. Mein Dank gilt auch den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Angewandte Mathematik der Universität Paderborn. Besonders zu nennen ist hier Frau Dipl.-Math. K. Witting.

Außerdem danke ich allen von mir betreuten Studenten, die mit ihren Studien-, Master- und Diplomarbeiten einen sehr wertvollen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Meinem Vater danke ich für das sorgfältige Korrekturlesen des Manuskripts.

Der größte Dank gebührt meiner Frau Andrea und meinen beiden Töchtern Maybrit und Tessa-Luisa, die stets sehr viel Verständnis gezeigt und somit maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss der Arbeit beigetragen haben.

Tobias Knoke
Frohnhausen, im Dezember 2010

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	IX
Kurzfassung, Abstract	XV
1 Einleitung	1
1.1 Aufbau der Arbeit	2
2 Entwurf, Betrieb und Optimierung hybrider Fahrzeugantriebe	5
2.1 Entwurf der Struktur	5
2.2 Bemessung der Komponenten	6
2.2.1 Heuristische Bemessung der Komponenten	6
2.2.2 Optimale Bemessung der Komponenten	7
2.3 Betriebsstrategien	7
2.3.1 Optimale Betriebsstrategien	8
2.3.2 Heuristische Betriebsstrategien	8
2.3.3 Suboptimale Betriebsstrategien	8
3 Modellbildung und Simulation von Fahrzeugen	11
3.1 Längsdynamik des Fahrzeugs	11
3.2 Modellierung des Antriebsstrangs	14
3.2.1 Verbrennungsmotor	14
3.2.2 Kupplung	18
3.2.3 Getriebe	19
3.2.4 Differentialgetriebe	19
3.2.5 Antriebsräder	19
3.3 Simulation von Fahrzeugantrieben	20
3.3.1 Simulationsmethoden	20
3.3.2 Simulationswerkzeuge	23
4 Konventionelle Abfallsammelfahrzeuge	25
4.1 Aufbau und Funktion	25
4.2 Fahrspiele	27

4.2.1	Messfahrten	28
4.2.2	Auswertung der Messfahrten	29
4.2.3	Repräsentatives Fahrspiel	30
4.3	Simulationsmodell	33
4.3.1	Fahrspiel	34
4.3.2	Längsdynamik	34
4.3.3	Getriebe	35
4.3.4	Aufbau	35
4.3.5	Verbrennungsmotor	36
4.4	Ergebnisse	36
4.4.1	Vergleich Kennfeld - Willans-Approximation	38
4.5	Fazit	38
5	Hybride Abfallsammelfahrzeuge - Entwurf und Modellierung	41
5.1	Entwurf der Struktur	41
5.1.1	Anzahl und Anordnung der Komponenten	42
5.1.2	Art der Komponenten	47
5.2	Simulationsmodell	53
5.2.1	Betriebsstrategie	55
5.2.2	Elektrischer Antrieb	55
5.2.3	Doppelschichtkondensator	56
5.2.4	Gleichstromsteller	57
5.2.5	Äquivalenter Kraftstoffverbrauch	58
5.3	Fazit	59
6	Hybride Abfallsammelfahrzeuge - Bemessung	61
6.1	Heuristische Bemessung	61
6.1.1	Verbrennungsmotor	61
6.1.2	Elektrischer Antrieb	61
6.1.3	Elektrischer Energiespeicher	62
6.1.4	Betriebsstrategie	64
6.1.5	Ergebnisse	65
6.2	Optimale Bemessung	67
6.2.1	Verbrennungsmotor	68
6.2.2	Elektrischer Antrieb	68

6.2.3	Elektrischer Energiespeicher	69
6.2.4	Parameterstudie	69
6.2.5	Optimierung	73
6.2.6	Ergebnisse	76
6.3	Fazit	78
7	Hybride Abfallsammelfahrzeuge - Betriebsstrategien	79
7.1	Freiheitsgrade des hybriden Antriebsstrangs	79
7.2	Optimale Betriebsstrategie	81
7.2.1	Deterministische Dynamische Programmierung	82
7.2.2	Ergebnisse	84
7.3	Suboptimale Betriebsstrategien	85
7.3.1	Stochastische Dynamische Programmierung	85
7.3.2	Ergebnisse	89
7.3.3	Zwischenfazit	93
7.4	Heuristische Betriebsstrategien I	93
7.4.1	Betriebszustände und Zustandswechsel	94
7.4.2	Drehmomentvorgabe für den Verbrennungsmotor	95
7.4.3	Betriebsstrategie	97
7.4.4	Parametrierung und Optimierung	97
7.4.5	Ergebnisse	100
7.4.6	Zwischenfazit	103
7.5	Heuristische Betriebsstrategien II	103
7.5.1	Parametrierung und Optimierung	105
7.5.2	Ergebnisse	105
7.5.3	Zwischenfazit	111
7.6	Vergleich der Betriebsstrategien	111
7.7	Fazit	113
8	Optimierung von Bemessung und Betriebsstrategie	115
8.1	Optimierungsparameter und Zielfunktionen	116
8.1.1	Optimierungsparameter	116
8.1.2	Zielfunktionen und Nebendingungen	117
8.2	Sequentielle Optimierung	118
8.2.1	Ergebnisse	119

8.3	Simultane Optimierung	121
8.3.1	Ergebnisse	121
8.4	Simultane Mehrzieloptimierung	124
8.4.1	Ergebnisse	125
8.5	Vergleich der verschiedenen Entwurfsansätze	126
8.6	Fazit	128
9	Zusammenfassung	129
	Literaturverzeichnis	137
A	Anhang	139
A.1	Ergänzungen zum Kapitel Konventionelle Abfallsammelfahrzeuge	140
A.1.1	Fahrspiel 1 - Innenstadt von Paderborn	140
A.1.2	Fahrspiel 2 - Innenstadt von Paderborn	143
A.1.3	Fahrspiel 3 - Paderborner Siedlungen	146
A.1.4	Fahrspiel 4 - Paderborner Siedlungen	149
A.1.5	Fahrspiel 5 - Paderborn-Elsen	152
A.1.6	Fahrspiel 6 - Paderborn-Schloss-Neuhaus	155
A.1.7	Zusammenfassung aller Fahrspiele	158
A.1.8	Fahrspiel 8: Repräsentatives Fahrspiel	159
A.1.9	Schaltstrategie	161
A.1.10	Simulationsparameter	161
A.2	Ergänzungen zum Kapitel Entwurf und Modellierung	162
A.2.1	Auswahl der Struktur	162
A.2.2	Auswahl der elektrischen Maschine	169
A.2.3	Auswahl des elektrischen Energiespeichers	173
A.3	Ergänzungen zum Kapitel Bemessung	177
A.3.1	Kenndaten des Doppelschichtkondensators	177
A.3.2	Heuristisch bemessenes hybrides Abfallsammelfahrzeug	177
A.3.3	Optimal bemessenes hybrides Abfallsammelfahrzeug	178
A.4	Ergänzungen zum Kapitel Betriebsstrategien	183
A.4.1	Optimale Betriebsstrategie	183
A.4.2	Suboptimale Betriebsstrategie	184
A.4.3	Heuristische Betriebsstrategien I	185

A.4.4	Heuristische Betriebsstrategien II	186
A.5	Ergänzungen zum Kapitel Optimierung von Bemessung und Betriebsstrategie	186
A.5.1	Bestrafungsfunktion	186
A.5.2	Sequentielle Optimierung	187
A.5.3	Simultane Optimierung	187
A.5.4	Simultane Mehrzieloptimierung	188