

Energieversorgung und Leittechnik einer Anlage mit Linearmotor getriebenen Bahnfahrzeugen

Zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik

der Universität Paderborn

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Andreas Pottharst

Referent: Prof. Dr.-Ing. Horst Grotstollen

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker,
Prof. Dr.-Ing. Joachim Lückel

Tag der mündlichen Prüfung: 09.12.05

D 14 - 212

Paderborn 2005

Berichte aus dem Fachgebiet Leistungselektronik und
Elektrische Antriebstechnik

Band 1

Andreas Pottharst

**Energieversorgung und Leittechnik einer Anlage
mit Linearmotor getriebenen Bahnfahrzeugen**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2006

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4878-1

ISSN 1862-3492

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet für Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik der Universität Paderborn. Sie ist eingebunden in das 1997 gegründete Forschungsprojekt *Neue Bahntechnik Paderborn* (NBP) und den Sonderforschungsbereich (SFB) 614 *Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus*.

Nun, während der letzten Arbeiten an dieser Dissertation, bereitet es mir Vergnügen, auf die vergangenen Jahre zurückzublicken und allen zu danken, die mich in diesem Vorhaben ermutigt und unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Grotstollen, dem ehemaligen Leiter des Fachgebiets, für seine kontinuierliche Förderung und Betreuung, seine wertvollen Hinweise und Anregungen sowie für die Begutachtung der Arbeit.

Desweiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Böcker, dem jetzigen Leiter des Fachgebiets, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und der Begutachtung der Arbeit sowie Prof. Dr.-Ing. J. Lückel für die Übernahme des Korreferats und das meiner Arbeit entgegen gebrachte Interesse danken.

Bei allen damaligen und jetzigen Mitarbeitern des Fachgebiets bedanke ich mich für die sehr gute Zusammenarbeit und für ihre großzügig gewährte Hilfsbereitschaft. Besonders zu nennen sind hier meine ehemaligen Kollegen Herr Dr.-Ing. N. Fröhleke, Herr Dr.-Ing. M. Henke und Herr Dipl.-Ing. Bernd Schulz. Auch am NBP-Projekt und dem SFB 614 beteiligte Mitarbeiter trugen durch gute Zusammenarbeit und kreativen Ideenaustausch zum Gelingen bei.

Mein Dank gilt außerdem den von mir betreuten Studenten, die mit ihren Studien- und Diplomarbeiten zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Meiner Frau Meike danke ich ganz herzlich für die liebevolle Unterstützung und die Rücksichtnahme, ohne die diese Arbeit nicht entstanden wäre.

Andreas Pottharst

Königswinter, im Dezember 2005

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	VIII
1 Einleitung	1
2 Das Linearmotorkonzept des Bahnsystems der NBP	4
2.1 Anforderungen des NBP-Systems an den Antrieb	4
2.2 Bordenergieversorgung	5
2.2.1 Realisierte Anwendungen von Linearmotor getriebenen Bahnen	5
2.2.2 Möglichkeiten der Energieversorgung eines NBP-Fahrzeugs	7
2.3 Wirkprinzip des NBP-Linearantriebs	8
2.4 Mathematische Modellbildung des doppelt gespeisten Linearmotors	10
2.4.1 Läufer- und Statorkreisfrequenz	11
2.4.2 Schubkraft des Linearmotors	11
2.4.3 Spannungsgleichungen für Läufer und Stator	12
2.4.4 Mechanisches Modell für die Längsbewegung	14
2.4.5 Wirkungsplan des doppelt gespeisten Linearmotors	14
2.5 Stationärer Betrieb	15
2.5.1 Energieübertragung im stationären Betrieb	17
3 Versuchsanlage im Maßstab 1:2,5	18
3.1 Profil des Streckenovals	19
3.2 Energieversorgung des Stators	22
3.2.1 Aufbau der Energieversorgung	24
3.3 Bordnetz eines NBP-Fahrzeugs	24
3.3.1 Elektrische Fahrzeugenergiespeicher	25
3.3.2 Bordnetz mit hybridem Energieversorgungsmodul	27
3.3.3 Gleichstromsteller der Fahrzeugbatterie	32
3.4 Modellbildung des Energieversorgungsmoduls	39
3.4.1 Ladegradschätzung der Batterie	40
3.4.2 Ladegradschätzung der Ultracaps	42

4 Betriebsleittechnik	44
4.1 Betrieb eines Gesamtsystems im Maßstab 1:1	44
4.1.1 Modularer Systemaufbau eines Fahrzeugs.	44
4.1.2 Kommunikationssysteme für ein Fahrzeug	45
4.1.3 Kommunikationssysteme für Fahrzeugverbünde.	47
4.2 Aufbau der Leittechnik der NBP-Versuchsanlage	48
4.2.1 Statorsollwert-Übermittlung	53
4.3 Synchronisation verteilter Systeme über Funkstrecke und Feldbus	54
4.3.1 Datentelegramm der Funkstrecke	55
4.3.2 Funkdatenverarbeitung mit Störfallroutinen	56
4.3.3 HiL-Prüfstand Funktechnik	59
4.3.4 Feldbuskommunikation	61
4.4 Positionserfassung eines Fahrzeugs	62
4.4.1 Ermittlung der elektrischen Läuferlage	63
4.4.2 Erfassung der Absolutposition eines Fahrzeugs	66
4.4.3 Bewertung der implementierten Positionserfassung	67
5 Regelung des Linearantriebs	68
5.1 Motorstromregelungen	70
5.1.1 Läuferstromregelung	70
5.1.2 Statorstromregelung	75
5.2 Linearmotor-Arbeitspunktvorgabe	76
5.2.1 Linearmotor-Wirkungsgrad im stationären Betrieb	77
5.2.2 Wirkungsgradoptimale Arbeitspunkteinstellung	79
5.2.3 Resultierende Struktur der Arbeitspunktsteuerung	84
5.2.4 Messergebnisse mit Arbeitspunktsteuerung	85
5.3 Regelung des Fahrprofils	89
5.3.1 Geschwindigkeitsregelung	89
5.3.2 Positionsregelung	90
5.3.3 Vorsteuerung durch Sollprofile	91
5.3.4 Resultierende Struktur der kaskadierten Regelung	92
5.3.5 Messergebnisse eines Positioniervorgangs auf dem Streckenoval ..	93

5.4 Betriebsstrategie für das Energiemanagement	94
5.4.1 Zustandsgraph	95
5.4.2 Batteriestromregelung	97
5.4.3 Übertragung der Betriebsstrategie auf das NBP-Fahrzeug	100
6 Energiemanagement für den Betrieb eines Fahrzeugs	103
6.1 Selbstoptimierendes Energiemanagement	103
6.2 Simulationsmodell des Prädiktors	106
6.2.1 Batteriemodellierung mit vier Subsystemen	107
6.3 Kombination diskreter und kontinuierlicher Optimierungsansätze	108
6.3.1 Kontinuierliche Mehrzieloptimierung	109
6.3.2 Diskrete Optimierung mit Suchbaumverfahren	114
6.4 Validierung am Simulationsmodell	116
6.4.1 Bewertung der unterschiedlichen Strategien	116
7 Zusammenfassung	120
Anhang	123
Literaturverzeichnis	125

Formelzeichen und Abkürzungen

Definitionen und Schreibweisen

$G(s)$	Übertragungsfunktion
i, u, \dots	komplexe Größen (Zeitzeiger, Raumzeiger)
$Im\{\underline{x}\}$	Imaginärteil der komplexen Zahl \underline{x}
$Re\{\underline{x}\}$	Realteil der komplexen Zahl \underline{x}
v_M^*, i_{Lq}^*, \dots	Sollwerte der Regelung
$x(t) \dots$	zeitkontinuierliche Funktionen
$x(t_k) \dots$	zeitdiskrete Funktionen

Formelzeichen und Symbole

A_F	Frontfläche des Versuchsfahrzeugs
a_M	Fahrzeugbeschleunigung
C_D	Kapazität zur Nachbildung der Batteriedurchtrittsreaktion
C_N	Batterienennkapazität
C_{ZK}	Kapazität des Gleichspannungszwischenkreises
E_N	Nennenergiedurchsatz der Batterie
E_{EVM}	abgegebene bzw. aufgenommene Energie des Energieversorgungsmoduls
f	Frequenz
F_B	beschleunigende Kraft
F_H	Hangabtriebskraft
f_L	Frequenz des Läuferstromes
F_L	Lastkraft
F_{Lu}	Luftwiderstandskraft
F_M	Schubkraft
F_N	Normalkraft
F_R	Reibkraft
f_S	Frequenz des Statorstromes
h	Höhe
G	Gasungsfaktor

i	Stromwert
i_B	Batteriestromwert
i_{O_2}	Sauerstoffstromwert
i_{UC}	Ultracap-Stromwert
I_1	einstündiger Batterieentladestrom
I_5	fünfstündiger Batterieentladestrom
k_L	Anzahl der separat bestromten Läufer eines Fahrzeugs
K	Krümmung
K_M	Maschinenkonstante des Linearmotors
K_{PiB}	Verstärkung des Batteriestromreglers
K_{PiL}	Verstärkung des Läuferstromreglers
K_{PiS}	Verstärkung des Statorstromreglers
K_{Pu}	Verstärkung des Zwischenkreisspannungsreglers
K_{Pv}	Verstärkung des Geschwindigkeitsreglers
K_{Px}	Verstärkung des Positionsreglers
k_S	Anzahl der Statorelemente des Statorabschnitts
L_E	Lebensdauererwartung der Batterie
L_{GS}	Induktivität der Gleichstromstellerdrossel
L_h	Hauptinduktivität des Linearmotors
L_L	Läuferinduktivität
L_S	Statorinduktivität
L_σ	Streuinduktivität
m_F	Masse des NBP-Fahrzeugs
m_Z	Maßzahl der diskreten Optimierung
N	Batteriezyklen pro Tag
N_L	Windungszahl des Läufers
N_M	Verhältnis von Normal- zu Tangentialkraft des Linearmotors
N_S	Windungszahl des Stators
p	Polpaarzahl
P_{AE}	Leistungsaufnahme der Ausgleichselektronik der Ultracaps
P_{APS}	theoretisch berechnete, ins Bordnetz eingespeiste Wirkleistung
P_B	Batteriewirkleistung
P_E	über den Linearmotor ins Bordnetz eingespeiste Wirkleistung

P_{EVM}	Wirkleistungsaufnahme des Energieversorgungsmoduls
P_{FN}	Wirkleistungsaufnahme der aktiven Feder-/ Neigetechnik
P_{Hy}	Wirkleistung des Hydraulikaggregats
P_L	Läuferwirkleistung
P_M	mechanische Leistung des Linearmotors
P_{PZ4000}	mit Power-Analyzer gemessene Wirkleistung
P_S	Statorwirkleistung
P_{SF}	Wirkleistungsaufnahme der aktiven Spurführung
P_{VB}	Verlustleistung an der Batterie
P_{VGS}	Verlustleistung am Gleichstromsteller
P_{VUC}	Verlustleistung an den Ultracaps
P_{VZK}	Verlustleistung im Gleichspannungszwischenkreis
P_{ZK}	Wirkleistungsaufnahme des Gleichspannungszwischenkreises
P_{24V}	Wirkleistung des 24V-Netzes des NBP-Fahrzeugs
$P_{\Sigma V}$	Summe der Verluste
q_B	Batterieladegrad
Q_L	Läuferblindleistung
Q_S	Statorblindleistung
q_{UC}	Ultracap-Ladegrad
Q_{UC}	elektrische Ladung der Ultracaps
R_D	ohmscher Widerstand zur Nachbildung der Batteriedurchtrittsreaktion
R_{GS}	ohmscher Widerstand der Gleichstromstellerdrossel
R_{IB}	Batterieinnenwiderstand
R_L	ohmscher Strangwiderstand des Läufers
r_M	Fahrzeugruck
R_S	ohmscher Strangwiderstand eines Statorabschnitts
R_{VB}	Verlustwiderstand der Batterie
R_{VUC}	Verlustwiderstand der Ultracaps
s	Schlupf
S	Einsatztage der Batterie pro Jahr
t	kontinuierliche Zeit
T_A	Abtastzeit

T_B	Batterietemperatur
T_{BN}	Nennbetriebstemperatur der Batterie
T_{EiB}	Ersatzzeitkonstante des Batteriestromregelkreises
T_{EiL}	Ersatzzeitkonstante des Läuferstromregelkreises
T_{EiS}	Ersatzzeitkonstante des Statorstromregelkreises
T_{Ev}	Ersatzzeitkonstante des Geschwindigkeitsregelkreises
T_{Ex}	Ersatzzeitkonstante des Positionsregelkreises
T_{FiB}	Verzögerung des Batteriestrommesswertfilters
T_{FiL}	Verzögerung des Läuferstrommesswertfilters
T_{FiS}	Verzögerung des Statorstrommesswertfilters
T_{Fu}	Verzögerung des Spannungsmesswertfilters
T_{Fv}	Verzögerung des Filters der berechneten Fahrzeuggeschwindigkeit
T_{GS}	Zeitkonstante der Gleichstromstellerdrossel
T_L	Zeitkonstante des Läufers
T_{NiB}	Nachstellzeit des Batteriestromreglers
T_{NiL}	Nachstellzeit des Läuferstromreglers
T_{NiS}	Nachstellzeit des Statorstromreglers
T_{Nu}	Nachstellzeit des Zwischenkreisspannungsreglers
T_{Nv}	Nachstellzeit des Geschwindigkeitsreglers
T_S	Zeitkonstante des Statorabschnitts
T_{totBL}	durch die Betriebsleittechnik bedingte Totzeit der Datenübertragung
T_{1BTX}	Sendezeit für 1 Byte
T_{8BTX}	Sendezeit für 8 Bytes
$T_{\Sigma iB}$	Summenzeitkonstante des Batteriestromregelkreises
$T_{\Sigma iL}$	Summenzeitkonstante des Läuferstromregelkreises
$T_{\Sigma iS}$	Summenzeitkonstante des Statorstromregelkreises
$T_{\Sigma u}$	Summenzeitkonstante des Zwischenkreisspannungsreglers
$T_{\Sigma v}$	Summenzeitkonstante des Geschwindigkeitsregelkreises
u	Spannungswert
u_B	Batteriespannungswert
U_{B0}	Batterieruhespannung
U_{NB}	Batterienennspannung
u_{UC}	Ultracap-Spannungswert

u_{ZK}	Zwischenkreisspannungswert
\ddot{u}	Übersetzungsverhältnis
V_L	Kupferverluste im Läufer
v_M	Verfahrgeschwindigkeit des NBP-Fahrzeugs
V_S	Kupferverluste im Stator
v_W	Windgeschwindigkeit
x_M	mechanische Position, Fahrzeugposition auf dem Streckenoval
α	Doppelverhältnis
ε	Drehwinkel
ε_S	Transformationswinkel der Statorstromregelung
ε_L	Transformationswinkel der Läuferstromregelung
η_B	Wirkungsgrad der Batterie
η_{EVM}	Leistungsverhältnis am Energieversorgungsmodul
η_{GS}	Wirkungsgrad des Gleichstromstellers
η_{LM}	Wirkungsgrad des Linearmotors
η_{UC}	Wirkungsgrad der Ultracaps
σ	Streuzyiffer
τ_p	Polteilung von Stator und Läufer
$\underline{\Psi}_L$	Läuferflussverkettung
$\underline{\Psi}_S$	Statorflussverkettung
ω	Winkelgeschwindigkeit
ω_L	Winkelgeschwindigkeit des Läuferfeldes
ω_S	Winkelgeschwindigkeit des Statorfeldes

Indizes

a,b,c	bezogen auf a,b,c-Koordinatensystem
d,q	bezogen auf d,q-Koordinatensystem
est	Schätzgröße
F	Fahrzeug
L	Läufergröße
max	Maximalwert
min	Minimalwert
N	Nenngröße

<i>opt</i>	optimaler Wert bezüglich einer Zielfunktion
<i>rms</i>	Effektivwert
<i>S</i>	Statorgröße
<i>stör</i>	Störgröße
<i>v</i>	Größe bezieht sich auf Geschwindigkeitsregelkreis
<i>V</i>	Verluste
<i>Vor</i>	Vorsteuergröße
<i>x</i>	Größe bezieht sich auf Lageregelkreis
α, β	bezogen auf α, β -Koordinatensystem

Abkürzungen

AMS	Autonomes Mechatronisches System
APS	Arbeitspunktsteuerung
ARW	Anti-Reset-Windup
DV	Datenverarbeitung
ENW	Entkopplungsnetzwerk
EVM	Energieversorgungsmodul eines Fahrzeugs
KMU	Kompensation der Motorunsymmetrie
MFM	Mechatronisches Funktionsmodul
NBP	Neue Bahntechnik Paderborn
NMT	Netzwerkmaster
PWR	Pulswechselrichter
SSI	Synchronous-Serial-Interface
VMS	Vernetztes Mechatronisches System

Nicht aufgeführte Formelzeichen und Definitionen werden im Text erläutert.