

# **Regelung der Längs- und Nickbewegung des Linearmotors für ein vollaktives spurgeführtes Bahnfahrzeug**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik  
der Universität Paderborn  
genehmigte Dissertation  
von

M.Sc. Bo Yang  
aus V.R. China

Referent: Prof. Dr.-Ing. Horst Grotstollen  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Frank Dörrscheidt  
Tag der mündlichen Prüfung: 22. Juli 2004

D 14-201  
Paderborn 2004



Berichte aus der Fahrzeugtechnik

**Bo Yang**

**Regelung der Längs- und Nickbewegung  
des Linearmotors für ein vollaktives spurgeführtes  
Bahnfahrzeug**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag  
Aachen 2004

**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., 2004

Copyright Shaker Verlag 2004

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-3380-6

ISSN 0945-0742

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Danksagung

Das vorliegende Buch entstand als Dissertation während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik der Universität Paderborn.

Zuallererst bin ich Herrn Professor Dr.-Ing. H. Grotstollen, dem Fachgebietsleiter, für die Förderung, die wissenschaftliche Betreuung, die kritischen, konstruktiven und wertvollen Anregungen zu großem Dank verpflichtet.

Desweiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Dörrscheidt für die Übernahme des Korreferates und die intensive Durchsicht des Manuskriptes danken. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danke ich.

Mein großer Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Xingshan Li für die empfehlung und das Interesse an meiner Arbeit.

In den viereinhalb Jahren, die ich am Lehrstuhl LEA gearbeitet habe, bildete das hervorragende und produktive Arbeitsklima am Lehrstuhl eine optimale Basis für meine deutsche Sprachekenntnis und die entstandene Arbeit. Hierfür bedanke ich mich bei allen damaligen und jetzigen Mitarbeitern im Fachgebiet ganz herzlich, insbesondere den Herren Dr.-Ing. Markus Henke, Dipl.-Ing. Andreas Pottharst, Dipl.-Ing. Bernd Schulz, Dipl.-Ing. Hermann Wetzel und Dr.-Ing. Norbert Fröhleke. Auch alle am NBP-Projekt beteiligten Mitarbeiter trugen durch gute Zusammenarbeit zum Gelingen bei.

Für das Korrekturlesen gilt mein großer Dank Frau R. Selbach und Herrn Dr.-Ing. M. Henke.

Ferner gebührt ein herzliches Dankeschön allen Studenten, die im Rahmen von SHK und Diplomarbeiten zu dem Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Vor allem möchte ich Herrn Dipl.-Wirt. Ing. Michael Meyer für seine Arbeit und das Engagement besonderen Dank aussprechen.

Ganz besonders danke ich allen Personen, die mir geholfen haben, hier aber wegen des beschränkten Umfangs unerwähnt geblieben sind.

Zum Schluss möchte ich bei meinem Mann Junyi bedanken, der während der Entstehung dieser Arbeit immer Verständnis gezeigt und mir Motivation gegeben hat. Speziell war er in der schwierigen Endphase immer für mich da und hat mir eine wunderbare Familienatmosphäre gebracht.

Paderborn, im Juli 2004

*Bo Yang*



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Prinzip und Eigenschaften des Linearantriebs für das Bahnsystem NBP</b> .....	<b>4</b>
2.1 NBP Konzept .....	4
2.2 Stand der Technik .....	6
2.2.1 Geschichte des Linearmotors .....	6
2.2.2 Merkmale von Linearantrieben für Bahnfahrzeuge .....	7
2.2.3 Anwendungen der Linearantriebe für Bahnsysteme .....	7
2.3 Merkmale des doppeltespeisten Langstator-Linearmotors der NBP .....	10
2.4 Auslegung des NBP-Linearmotors für den stationären Betrieb .....	11
2.4.1 Stationäres Ersatzschaltbild des Motors .....	11
2.4.2 Festlegung der maximalen Statorabschnittslänge .....	15
<b>3 Entwurf der Nickregelung des Fahrwerks</b> .....	<b>19</b>
3.1 Anwendung des Einzelachsfahrwerks .....	19
3.2 Modellierung der Nickbewegung des Fahrwerks .....	20
3.3 Reglerentwurf .....	26
3.3.1 Entwurf des Zustandsreglers .....	27
3.3.2 Entwurf eines Zustandsbeobachters .....	28
3.4 Variante I: Entkopplung der Nickregelung von der Antriebsregelung .....	31
3.5 Variante II: Kopplung der Nickregelung mit der Antriebsregelung .....	36
3.6 Verlustoptimale Nickregelung .....	40
3.7 Gegenüberstellung der Reglervarianten .....	42
<b>4 Realisierung der Nickregelung</b> .....	<b>44</b>
4.1 Experimentierumgebung .....	44
4.1.1 Aufbau des Versuchsstands .....	44
4.1.2 DSP-Plattform und RTI .....	46
4.1.3 Stromrichter zur Motoransteuerung .....	47
4.1.4 Sensorik zur Erfassung des Luftspalts und Signalverarbeitung .....	47
4.2 Experimentelle Ergebnisse und Auswertung .....	48
4.2.1 Entkoppelte Variante .....	49

---

4.2.2	Gekoppelte Variante	51
<b>5</b>	<b>Regelung der Längsbewegung im Kurzstatorbetrieb</b>	<b>54</b>
5.1	Anwendung des Kurzstator-Linearmotors	54
5.2	Modellierung des Kurzstator-Linearmotors mit Reaktionsschiene	55
5.2.1	Wirkprinzip	55
5.2.2	Bemessungen im stationären Betrieb	56
5.3	Auslegung des Kurzstator-Linearmotors mit Reaktionsschiene	67
5.3.1	Aspekte zur Motorauslegung	67
5.3.2	Auslegung der Reaktionsschiene für den Versuchsstand	69
5.4	Aufbau der Reaktionsschiene am Versuchsstand	71
5.5	Identifikation der elektrischen Parameter des Kurzstator-Linearmotors	71
5.5.1	Randbedingungen zur Identifikation	72
5.5.2	Parameterbestimmung im Stillstand	72
5.6	Regelung des Asynchron-Kurzstatormotors	73
5.6.1	Feldorientierte Regelung	73
5.6.2	Direkte Kraftregelung nach dem Sliding Mode-Prinzip	76
5.6.3	Experimentelle Untersuchungen	87
<b>6</b>	<b>Regelstrategie für den Übergang Langstator/Kurzstator</b>	<b>93</b>
6.1	Regelverfahren	93
6.1.1	Langstatorbetrieb	93
6.1.2	Kurzstatorbetrieb	94
6.2	Flexibles Fahrprofil	95
6.3	Mischbetrieb von Lang- und Kurzstator-Linearmotor	97
6.3.1	Eigenschaften des Mischbetriebs	97
6.3.2	Praktische Ergebnisse	101
<b>7</b>	<b>Nickregelung im Kurzstatorbereich</b>	<b>103</b>
7.1	Modellierung und Entwurf	103
7.1.1	Variante I: Flussbildende Ströme als Stellgröße	106
7.1.2	Variante II: Kraftbildende Ströme als Stellgröße	108
7.1.3	Verlustoptimale Nickregelung	110
7.2	Experimentelle Ergebnisse der Nickregelung	111
7.2.1	Ergebnisse der Nickregelung mit flussbildenden Strömen als Stellgröße	111
7.2.2	Ergebnisse der Nickregelung mit kraftbildenden Strömen als Stellgröße	114

---

7.3 Bewertung der Regelvarianten .....	118
<b>8 Zusammenfassung .....</b>	<b>119</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>121</b>

# Formelzeichen und Abkürzungen

## Abkürzungen

DKR	Direkte Kraftregelung
FOR	Feldorientierte Regelung
NBP	Neue Bahntechnik Paderborn
SM	Sliding Mode

## Definitionen und Schreibweisen

$\mathbf{a}, \mathbf{b}, \dots$	Vektoren
$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \dots$	Matrizen
$\underline{i}, \underline{u}, \dots$	Komplexe Größen (Zeitzeiger, Raumzeiger)
$\tilde{x}, \tilde{y}, \dots$	Schätzwerte
$\omega^*, i_{Lq}^*, \dots$	Sollwerte der Regelung
$Re\{\underline{x}\}$	Realteil der komplexen Zahl $\underline{x}$
$Im\{\underline{x}\}$	Imaginärteil der komplexen Zahl $\underline{x}$

## Formelzeichen und Symbole

$a$	Fahrzeugbeschleunigung
$A$	Eisenfläche des Motors
$A_m$	Ankerstrombelag (Effektivwert)
$b_p$	Breite des Einsenkerns
$B$	Magnetische Flussdichte, Induktion
$\cos\varphi$	Leistungsfaktor
$d$	Dicke der hoch leitfähigen nichtferromagnetischen Schicht
$\delta$	Luftspalt mechanisch

---

$\delta''$	Luftspalt magnetisch
$e$	Fehlerwert
$\eta$	Wirkungsgrad des Linearmotors
$f$	Frequenz
$F_{Last}$	Lastkraft
$F_x$	Schubkraft
$F_R$	Reibkraft
$F_z$	Normalkraft
$H$	Magnetische Feldstärke
$h_{sec}$	Dicke des magnetischen Rückschlusses
$i, I$	Stromwert
$k_{Al}$	Ausbreitungskonstante der elektromagnetischen Wellen in Aluminium
$k_c$	Caterscher Faktor
$k_{Fe}$	Ausbreitungskonstante der elektromagnetischen Wellen in Eisen
$k_{RN}$	Russel- und Norsworthy-Faktor
$k_{sat}$	Sättigungsfaktor
$k_{tr}$	Übersetzungsverhältnis
$L$	Lagrangefunktion
$L_h$	Hauptinduktivität
$L_L$	Läuferinduktivität
$L_{L\sigma}$	Streuinduktivität Läufer
$L_R$	Induktivität Reaktionsschiene
$L_{R\sigma}$	Streuinduktivität Reaktionsschiene
$L_S^{LS}, L_S^{KS}$	Induktivität der Langstator- bzw. Kurzstatorwicklung
$L_{SL}, M$	Koppelinduktivität
$L_{S\sigma}^{LS}, L_{S\sigma}^{KS}$	Streuinduktivität der Langstator- bzw. Kurzstatorwicklung
$m$	Masse
$M_{\ominus}$	elektromagnetisches Nickmoment
$N$	Windungszahl eines Stranges
$\omega_c$	Spulenweite
$\omega_L$	Kreisfrequenz von Läufer <span>span style="font-variant: small-caps;"&gt;spannung und -strom</span>

---

$\omega_m$	Kreisfrequenz der Bewegung
$\omega_R$	Kreisfrequenz von Spannung und Strom der Reaktionsschiene
$\omega_S$	Kreisfrequenz von Spannung und Strom des Stators bzw. Ständers
$p$	Polpaarzahl
$P_L$	Wirkleistungsaufnahme der Läuferwicklung
$P_m$	mechanische Wirkleistung
$P_S$	Wirkleistungsaufnahme der Statorwicklung
$q$	Lochzahl, Zahl je Pol und Strang
$R_L$	Widerstand eines Läuferelements
$R_R$	Ersatzwiderstand der Reaktionsschiene
$R_S$	Widerstand eines Statorsegments bzw. Ständers
$\underline{\Psi}_h$	Verkettungen der Ständerwicklung mit dem Luftspaltfeld
$\underline{\Psi}_R$	Reaktionsschienenflussverkettung
$\underline{\Psi}_S$	Ständerflussverkettung
$\rho$	Widerstandsziffer
$s$	Schlupf
$s$	Schaltfläche oder Schaltfunktion
$S$	Stromdichte
$\underline{S}$	Scheinleistung
$\sigma$	Streuziffer
$\sigma_{Al}$	Leitfähigkeit Aluminium bei 20°C
$\sigma_{Fe}$	Leitfähigkeit Eisen bei 20°C
$\tau_p$	Polteilung von Stator und Läufer
$\Theta$	Nickwinkel
$u, U$	Modelleingangsgröße, Spannung (Effektivwert)
$V$	Lyapunov-Funktion
$v_m$	Fahrzeuggeschwindigkeit
$X_\delta$	Koppelreaktanzen des Kurzstator-Linearmotors
$\xi$	Wicklungsfaktor
$x_m, x$	Mechanische Position

**Indizes**

$a, b, c$	bezogen auf a,b,c-Koordinatensystem
$\alpha, \beta$	bezogen auf $\alpha, \beta$ -Koordinatensystem
$d, q$	bezogen auf d,q-Koordinatensystem
$kin$	kinetisch
KS	Kurzstatorbetrieb oder -motor
$L$	Läufergröße
LS	Langstatorbetrieb oder -motor
$m$	mechanische Größe
$max$	Maximalwert
$pot$	potentiell
$S^1$	Statorgröße (Langstatorbetrieb) bzw. Ständergröße (Kurzstatorbetrieb)

---

1. Für den Langstatorbetrieb wird das streckenseitige Motorteil als Stator bezeichnet, für den Kurzstatorbetrieb wird das fahrzeugseitige Motorteil als Ständer bezeichnet.