

Simulation von Betriebsverhalten und Energieflüssen des NBP-Linearantriebes

Markus Henke, Andreas Kathöfer, Horst Grotstollen
henke@lea.upb.de
Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik
Universität Paderborn, FB 14 - LEA
Pohlweg 47-49; 33098 Paderborn

Kurzfassung

Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojektes NBP wird an der Universität Paderborn ein neuartiges, auf dem Betrieb kleiner autonomer Einheiten basierendes Bahnsystem entwickelt [1]. Der Antrieb der Fahrzeuge geschieht mittels eines Langstator-Linearantriebs. Dieser Beitrag behandelt die Modellbildung und Simulation des Fahrtriebs mit Hilfe des Simulationswerkzeugs MATLAB/Simulink. Weiterhin werden die Energieflüsse im Antriebssystem zunächst analysiert und anschließend mit einem off-line entworfenen übergeordneten Sollwertrechner im Regelkreis optimiert.

1 Versuchsstandskonzept für den Linearantrieb

Im Hinblick auf die Anwendung im realen System bietet die Simulation wertvolle Möglichkeiten, die elektrischen Parameter des Linearantriebs im Vorhinein zu optimieren und geeignete Regelverfahren für den Motor zu entwerfen. Hierzu ist zunächst eine mathematische Beschreibung des physikalischen Systems zu finden, und anschließend wird das mathematische Modell im Rechner unter MATLAB/Simulink blockorientiert beschrieben. Anhand des erhaltenen, in der Regel stark nichtlinearen Modells wird eine Reglerauslegung unter Zuhilfenahme verschiedener Toolboxen vorgenommen. Die Analyse des geregelten Systems lässt dann Rückschlüsse auf die erreichbare Dynamik im Fahrbetrieb und auf Optimierungsmöglichkeiten in der Regelung zu. Ziel der Simulation ist es ausserdem, ein skalierbares Modell zu erstellen, das in einfacher Weise erweiterbar und auf 1:1 Systeme übertragbar wird.

Zur Untersuchung des Langstator-Linearantriebs wurde ein Versuchsstand aufgebaut, auf den sich die Simulation des Antriebssystems zunächst konzentrieren soll. Im zwischen den Führungsschienen liegenden, 8 m langen Stator wird ein magnetisches Feld erzeugt, das in Wechselwirkung mit dem Läuferfeld im Fahrzeug eine Schubkraft hervorruft. Geschwindigkeit und Amplitude von Stator- und Läuferfeld sind frei regelbar. Der Stator ist geteilt ausgeführt und wird nur dort bestromt, wo sich das Fahrzeug augenblicklich befindet, sodass das Übergangsverhalten zwischen verschiedenen Speisesegmenten detailliert analysiert und beschrieben werden kann.

Das Fahrzeug ist mit zwei Sekundärteilen ausgerüstet, die über zwei Pulswechselrichter separat versorgt werden. Desweiteren verfügt der Versuchsstand über eine Messeinrichtungen für die Fahrzeugposition und den mechanischen Luftspalt.

2 Regelkonzept

Der Statorstrom wird weitgehend entkoppelt von der Fahrzeugbewegung statorfest in Frequenz und Amplitude geregelt. Die Regelung der auf das Fahrzeug wirkenden Schubkraft wird mit Hilfe des Läuferstrombelags vorgenommen, dessen Komponenten orthogonal und parallel zum Statorfeld die Regelgrößen bilden. Der Kraftregelung ist eine Geschwindigkeitsregelung und die Kompensation von Nichtlinearitäten überlagert (Bild 1).

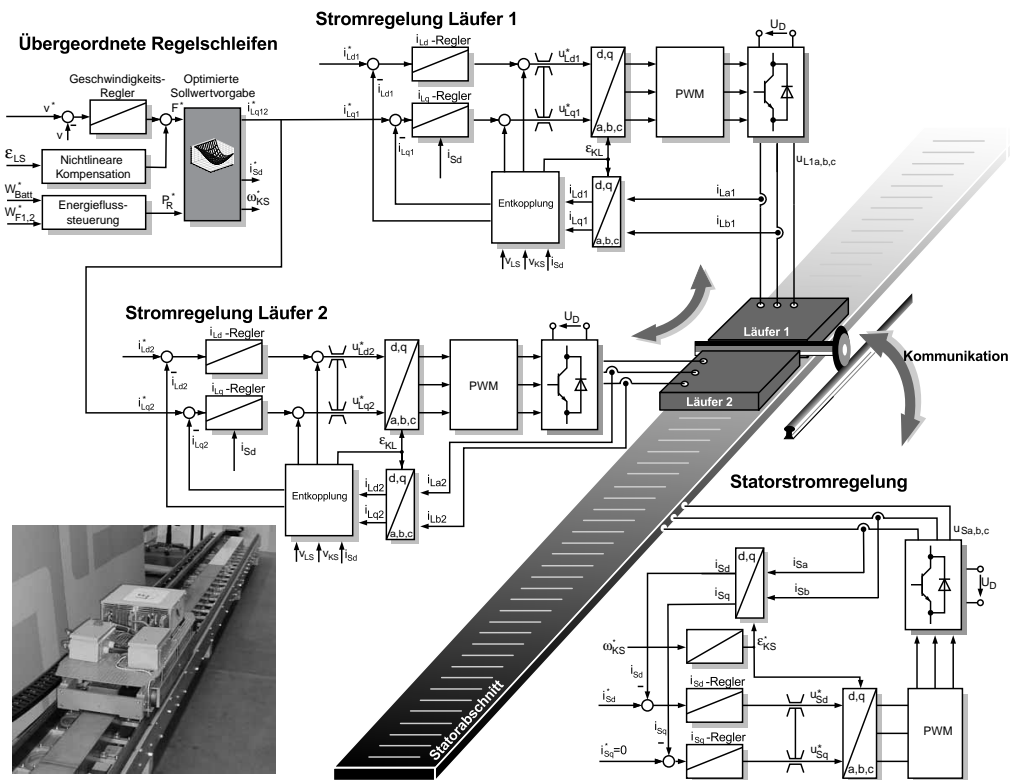


Bild 1: Wirkungsplan der Regelung von Statorstrom und Fahrzeugbewegung

Die Vorgabe des Sollwertes für Statorstromamplitude und –frequenz wird durch einen unter 4. beschriebenen Sollwertrechner realisiert, da über diesen Wert verschiedene Optimierungsziele hinsichtlich Wirkungsgrad, Leistungsfluss und Gesamtverlusten realisierbar sind.

3 Modellbildung und Simulation des geregelten Systems

Zunächst wird ein mathematisches Modell des Versuchsstandes abgeleitet, welches anschliessend in Verbindung mit entsprechenden Regeleinrichtungen unter MATLAB/Simulink zu einem Gesamtmodell zusammengefügt wird. Die elektrischen Parameter des Versuchsstandes wurden durch Identifikationsverfahren und Messungen bestimmt. Im wesentlichen handelt es sich hierbei um die Ermittlung der ohmschen Widerstandswerte, aller Haupt-, Koppel- und Streuinduktivitäten und einer Massenbestimmung. Das mechanische System wird hier zunächst als Einmassensystem angenommen. Die Modellgleichungen des Motors (Spannungs- und Kraftgleichungen) beinhalten die Kopplungen zwischen allen Läufer- und Statorsegmenten. Die Spannungsgleichungen werden über Ableitungen der Flussverkettungen gewonnen und die Kraftgleichung ergibt sich aus einer Energiebilanz des Antriebs [2]. Weiterhin muss das gesamte System an einem einheitlichen mit dem Statorstrombelag bewegten Koordinatensystem orientiert werden, was umfangreiche Transformationen der Strom- und Spannungskomponenten erforderlich macht.

Der Antrieb weist eine Vielzahl nichtlinearer Einflussfaktoren auf, die bei der Modellierung so exakt wie möglich nachgebildet werden [3].

- Stator- und Läufersegmente werden durch vier Pulswechselrichter mit Gleichspannungszwischenkreis gespeist. Bei den Umschaltvorgängen der Ventile entstehen Sicherheitszeiten die als Fehlerspannungen auf den Motor wirken. Der Spannungssollwert wird verfälscht. Dieser Effekt wird durch Einfügen von Totzeitgliedern in die Übertragungsfunktionen nachgebildet.
- Der Positionssensor (Seilzugsensor mit Inkrementalgeber) weist aufgrund von Seiltrommel und Getriebe eine leichte ortsvariante Störwelligkeit auf, die im Modell durch eine tabellarisch abgelegte Störgrösse berücksichtigt wird.
- Die Endpole der Linearmotorelemente sind schwächer bewickelt als die Hauptpole, sodass die Haupt- und Koppelinduktivität zwischen allen Stator- und Läufersegmenten ebenfalls eine ortsvariante Welligkeit aufweist. Verlässt das Fahrzeug ein Statorsegment, nimmt die Koppelinduktivität bis auf null ab. Die Simulation dieser Effekte erfolgt mittels eines linearen Anstiegs bei Teilbedeckung und überlagerten ortsvarianten Oberwellen. In der Simulation wird der Oberwellengehalt aus der ortsvarianten Fouriertransformierten der gemessenen Hauptinduktivität ermittelt und nach dem n-ten Glied abgebrochen.
- Die Reibung im Antriebssystem wird als coulombsche Reibung angesetzt.

Der geregelte Antrieb ist als Gesamtmodell unter MATLAB/Simulink implementiert. Es wurde jeweils eine CMEX S-function für beide Statorsegmente und beide Läufersegmente programmiert. Hierdurch können die nichtlinearen Einflüsse sehr flexibel und übersichtlich eingebracht werden. Diese Zusammenfassung erfolgte um die Anzahl der Blockverbindungen zu minimieren. Das Simulationsmodell wurde anschliessend anhand experimenteller Untersuchungen verifiziert [3]. Bild 2 zeigt beispielhaft die Gegenüberstellung zwischen gemessenen und simulierten Läufergrössen während eines Beschleunigungsvorganges auf 1.5 m/s.

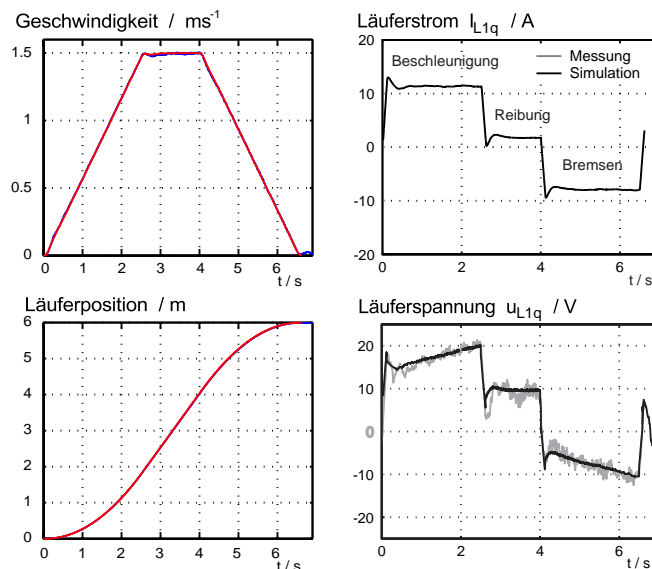
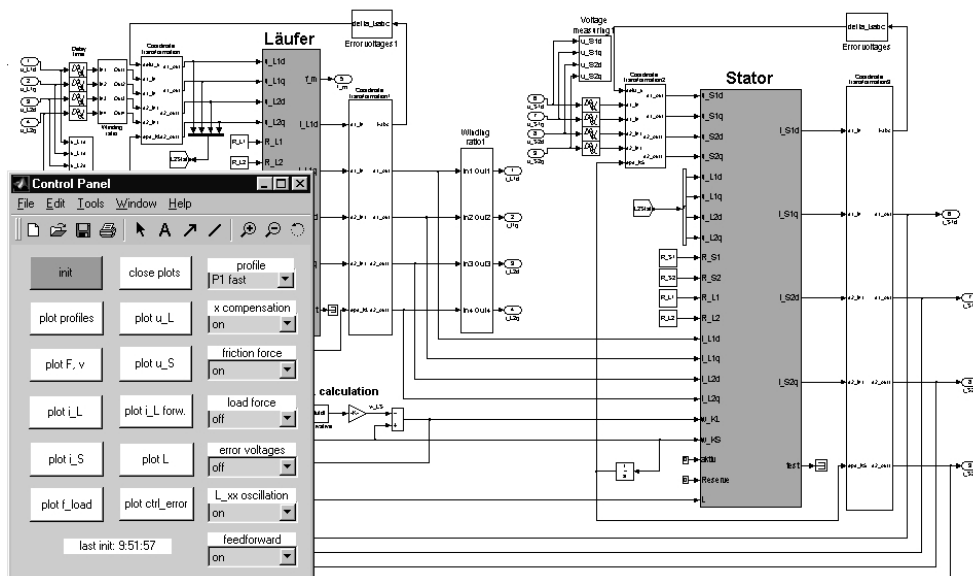


Bild 2: Gemessene und simulierte Läufergrößen

Bei Position und Geschwindigkeit ist eine sehr genaue Übereinstimmung von Messung und Simulation festzustellen. Das hochdynamische Regelverhalten der Stromregelung und die in den Stromregelkreis wirkenden Fehlerspannungen bewirken ein Verrauschen der Messwerte.

Um die Handhabung des Simulationsmodells möglichst komfortabel zu gestalten, wurde ein *Control Panel* programmiert, in dem mittels Pull-down-Menüs Voreinstellungen zum Fahrprofil, zur nichtlinearen Kompensation und zur Aufschaltung von Störgrößen vorgenommen werden können (Bild 3).



4 Energieflusssteuerung mit off-line optimierten Führungsgrößen

Das Antriebsmodell erlaubt aufbauend auf der Simulation dynamischer Vorgänge ebenfalls die Analyse der Energieflüsse zwischen Stator und Läufer im stationären Betrieb. Die elektromagnetische Kopplung der Elemente bewirkt die Übertragung von Wirk- und Blindleistung und deren Umsetzung in mechanisch abgegebene Leistung. Dieser Leistungsfluss hängt in starkem Maße von Amplitude und Geschwindigkeit des Statorfeldes ab. Durch über- oder untersynchronen Betrieb ist der Energiefluss ins Fahrzeug im motorischen sowie im generatorischen Betrieb steuerbar. Randbedingungen der Stellglieder wie Strom- und Spannungsgrenzen müssen im Rahmen der Simulation Berücksichtigung finden, sodass die sich daraus ergebenden Betriebsgrenzen eindeutig ermittelbar werden.

Der stationäre Betrieb des Antriebs stellt sich ein, wenn Schubkraft, mechanische Geschwindigkeit und Rückspeiseleistung annähernd konstant sind. In dem Fall können die Stator- und Läuferströme so vorgegeben werden, dass die geforderte Sollschubkraft bereitgestellt wird, jedoch eine Minimierung der Wärmeverluste in Stator und Läufer stattfindet. Diese Optimierung geschieht mit Hilfe des Statorstrom-Amplitudensollwertes. Soll gleichzeitig der in den Läufer übertragene Energiefluss vorgegeben werden, so verbleibt unter Berücksichtigung der mechanischen Geschwindigkeit als frei wählbarer Parameter der Schlupf s .

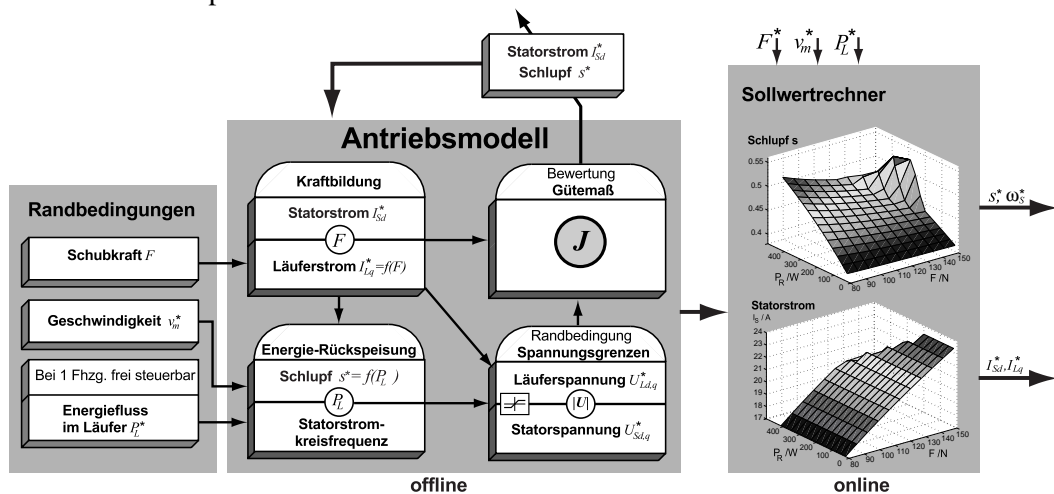


Bild 4: Konzept der optimierten Sollwertvorgabe

Bild 4 stellt das Optimierungsproblem dar. Das zu minimierende Gütemaß J besitzt zwei einzeln gewichtbare, auf die Ströme I_S und I_L bezogene Anteile und lautet hier für den verlustminimalen Fall

$$J = w_1 \cdot R_S \cdot (I_S)^2 + w_2 \cdot R_L \cdot (I_L)^2 \quad \text{mit } J = P_v \text{ für } w_1 = w_2 = 3 \quad (1)$$

Hierbei sind Randbedingungen zu erfüllen, die zum einen die Einhaltung der Sollgrößen für Schubkraft, Geschwindigkeit und Rückspeiseleistung beinhalten, und

zum anderen die Einhaltung der Spannungsgrenzen für Stator- und Läuferstromversorgung vorsehen. Für die in den Läuferkreis zurückgespeiste Leistung P_R gilt bei konstanter Schubkraft

$$P_R = F_m \cdot v_m \cdot \frac{1}{1/s - 1} - 3 \cdot R_L \cdot \left(\frac{K}{I_s} \right)^2 \quad \text{mit } K = I_s \cdot I_L = \text{konst.} \quad (2)$$

Zusammenfassend werden im Optimierungsprozess den Eingangsgrößen Schubkraft, Geschwindigkeit und Rückspeiseleistung eine optimale Einstellung für die Stromamplituden und den Schlupf zugewiesen und in Kennfeldern offline abgelegt. Die erhaltenen Kennfelder können dann im Echtzeitbetrieb online zur Sollwertvorgabe ausgewertet werden und führen zum gewünschten Verhalten des Antriebs. Bild 5 stellt das Optimierungsergebnis für die Sollwerte dar, die in Abhängigkeit der als konstant angenommenen Größen Rückspeiseleistung und Schubkraft vorgegeben werden.

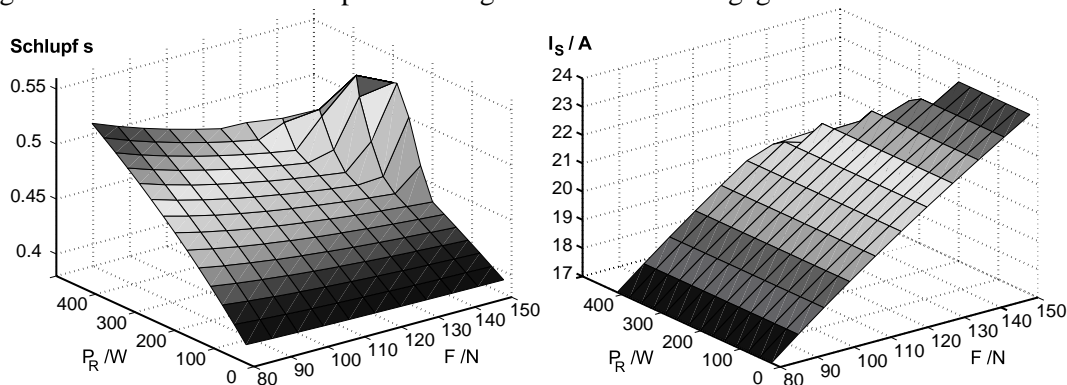


Bild 5: Optimierungsergebnis für Schlupf- und Statorstromsollwert (verlustoptimal)

Durch Variation des Gütemaßes J kann in einfacher Weise ein anderes Optimierungsziel, beispielsweise ein optimaler Läuferwirkungsgrad gewählt werden.

5 Literatur

- [1] *J. Lückel, H. Grotstollen, K. Jäker, M. Henke, X. Liu:* Mechatronic Design of a Modular Railwar Carriage. Int. IEEE/ASME Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics AIM'99, Atlanta, USA, 1999 S. 1020-1025.
- [2] *M. Henke, H. Grotstollen:* Modelling and Control of a Longstator-Linearmotor for a Mechatronic Railway Carriage. IFAC Conf. on Mechatronic Systems, MECHATRONICS 2000, Darmstadt, S. 353-357.
- [3] *A. Kathöfer:* Modellierung und experimentelle Untersuchung eines Prüfstandes für geregelte doppeltespeiste Linearmotoren. Studienarbeit am Fachgebiet Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik, Universität Paderborn 2001