

Konzept zur berührungslosen Energieübertragung mit doppeltgespeistem Langstatorlinearmotor

Dipl. Ing. Andreas Pottharst, Prof. Dr. Ing. Horst Grotstollen
Universität Paderborn, FB14, Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik
Pohlweg 47 - 49, 33098 Paderborn
Tel.: ++49 - 5251 - 605482, Fax.: ++49 - 5251 - 605483, Email: pottharst@lea.upb.de

Concept of contactless energy transmission with a doubly-fed Long Stator Linearmotor

Since 1997 transport systems with doubly-fed longstator linear motors have been investigated at the University of Paderborn. This kind of motor not only drives vehicles, but also offers the opportunity of a contact-free energy transmission into the vehicles on board supply system. In this regard an energy management has been analysed on an 8 m test bed, which was built in the course of the NBP (Neue Bahntechnik Paderborn) project. A description of this test bed is given and experimental results about a concept of an energie management, which optimizes the degree of efficiency of the current operating point of the linear motor, is discribed.

Keynotes: Linear drives, Energy system management, Motion control, Transmission of electrical energy

1. Einführung und Überblick

An der Universität Paderborn werden seit fünf Jahren Untersuchungen zur Lösung von Transport- und Förderaufgaben mit Hilfe von Linearmotoren durchgeführt. Als Demonstrator dient das Forschungsprojekt Neue Bahntechnik Paderborn (NBP), in dem der Einsatz des Linearmotors in bestehender Bahninfrastruktur im Vordergrund steht. Die regelungstechnischen und logistischen Aufgabenfelder ähneln hierbei automatisierten Gepäckförderanlagen.

Bei der NBP wird ein doppeltgespeister Langstator-Linearmotor zum Antreiben und Bremsen von schienengebundenen vollautomatisierten Shuttlefahrzeugen verwendet. Der Antrieb besteht hierbei aus zwei unabhängig voneinander bestromten, mit Drehfeldwicklungen ausgerüsteten Teilen: Der Stator wird entlang der Strecke zwischen herkömmlichen Bahnschienen verlegt, und der Läufer ist an der Unterseite des Fahrwerks befestigt.

Der doppeltgespeiste Langstator-Linearmotor ermöglicht hierbei nicht nur das Antreiben der autonom betriebenen Fahrzeuge, sondern kann durch geschickte

Wahl des Arbeitspunktes des Motors auch zur Übertragung der nötigen Bordenergie ins Fahrzeug verwendet werden. Auf Oberleitungen und Stromschienen kann somit gänzlich verzichtet werden. Um eine gleichbleibende Energieversorgung des Bordnetzes bei starken Schubkraftschwankungen sicherzustellen, wird ein Energiepuffer, eine Batterie in Verbindung mit leistungsstarken Doppelschichtkondensatoren, verwendet. Dieser Energiepuffer speist, wenn nötig, Energie in das Bordnetz, um später über den Linearmotor wieder aufgeladen zu werden. Aus diesem Grund ist für das Antriebssystem ein intelligentes Energiemanagement notwendig, das informationstechnisch stark an die Stromregleinrichtungen des Motors gekoppelt ist.

Erste Untersuchungen zur Energieübertragung über den Linearmotor und die Erprobung eines entsprechenden Energiemanagements wurden bereits an einem Linearmotorprüfstand an der Universität Paderborn durchgeführt und sollen im folgenden dargestellt werden.

2. Systembeschreibung

Dieser Prüfstand weist eine Länge von 8 m auf, wobei der Stator in zwei Abschnitte aufgeteilt ist, welche aus energetischen Gründen unabhängig voneinander bestromt werden. Auf der Unterseite eines Schlittens, welcher auf vier Rollen über Schienen geführt wird, befinden sich zwei separat bestromte und an einer Achse drehbar aufgehängte Läuferelemente. Mit dieser Anordnung der Läufer werden Untersuchungen zu einer Nickregelung zur Stabilisierung der waagerechten Lage der Läuferachse durchgeführt [1].

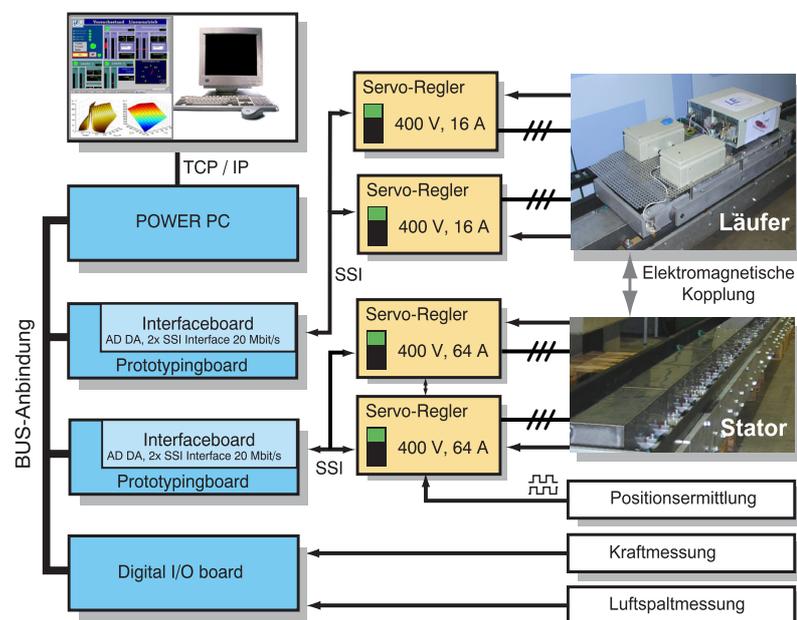


Bild 1: Linearmotorprüfstand

Die beiden Läuferelemente und die Statorabschnitte werden über handelsübliche Umrichter mit Spannung versorgt. Die Umrichter kommunizieren über eine bidirektionale serielle Schnittstelle (SSi) mit einem Power PC und angebundener Prototy-

ping-Hardware, auf welcher die Regelung der Anlage digital realisiert ist. Über die SSI werden Spannungssoll- und Stromwert zyklisch ausgetauscht, während zur Positionserfassung des Schlittens ein zusätzlicher Seilzugsensor verwendet wird.

2.1 Stationärer Betrieb am Linearmotorprüfstand

Das nachfolgende Ersatzschaltbild verdeutlicht die elektrotechnischen Zusammenhänge für den stationären Betrieb an diesem Motorprüfstand. Dieser Betrachtung liegt ein Betriebszustand zugrunde, bei dem sich beide Läuferelemente über einem Statorabschnitt befinden.

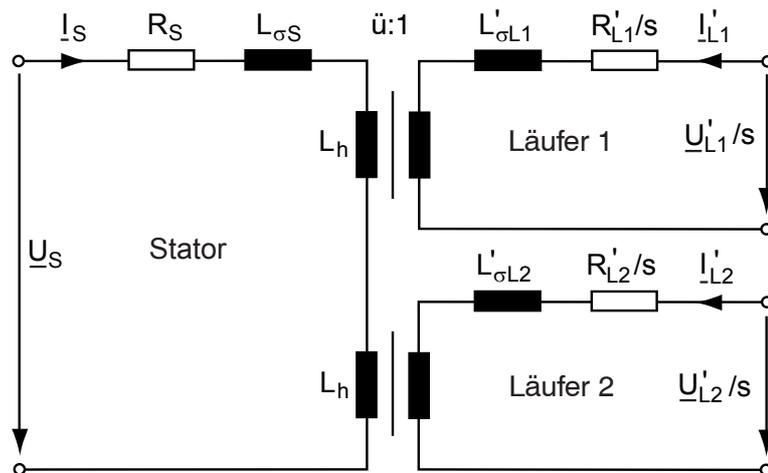


Bild 2: T-Ersatzschaltbild des Linearantriebs

Unter Berücksichtigung des in Bild 2 dargestellten T-Ersatzschaltbildes ergeben sich in statorstromorientierten dq - Koordinaten mit einem Statorstrom von $I_s = I_{sd} + j0$ [2] die in Gleichung (2.1) und (2.2) festgehaltenen Beziehungen für die Komponenten der Statorspannung \underline{U}_s und der Läufer Spannung \underline{U}_L . Hierbei wird ein verlustoptimaler Betrieb des Linearmotors mit einem Läuferstrom von $I_L = 0 + jI_{Lq}$ vorausgesetzt.

$$U_{sd} = R_s I_{sd} - \frac{2L_h}{\ddot{u}} \omega_s I_{Lq} \quad U_{sq} = (L_{\sigma s} + 2L_h) \omega_s I_{sd} \quad (2.1)$$

$$U_{Ld} = \left(L_{\sigma L} + \frac{L_h}{\ddot{u}^2} \right) \omega_L I_{sd} \quad U_{Lq} = R_L I_{Lq} + \frac{L_h}{\ddot{u}} \omega_L I_{sd} \quad (2.2)$$

Durch Erweitern der Spannungsgleichung des Läufers mit dem Dreifachen des konjugierten Stromzeigers ergeben sich die komplexe Scheinleistung einer Läuferwicklung \underline{S}_L und deren Realteil, die Wirkleistung P_L :

$$P_L = \Re \{ \underline{S}_L \} = 3 \underline{U}_L I_L^* \quad (2.3)$$

Wird Leistung vom Stator in die Läufer übertragen, so sind die den beiden Läuferwicklungen zugeführten Leistungen bei identischer bestromten negativ. Für die

Wirkleistung eines Bordnetzes $P_B = -2 \cdot P_L$ ergibt sich unter Berücksichtigung der Beziehungen (2.2) und (2.3) der folgende Zusammenhang:

$$P_B = -6\omega_L \frac{L_h}{\ddot{u}} \cdot I_{Sd} I_{Lq} - 6R_L \cdot I_{Lq}^2 \quad (2.4)$$

Damit Leistung über den Linearmotor ins Bordnetz eingespeist werden kann, muß somit die Bedingung

$$-\omega_L \frac{L_h}{\ddot{u}} \cdot I_{Sd} I_{Lq} > R_L \cdot I_{Lq}^2 \quad \text{bzw.} \quad \omega_L > -\frac{\ddot{u} R_L}{L_h} \cdot \frac{I_{Lq}}{I_{Sd}} \quad (2.5)$$

erfüllt sein.

Unter Berücksichtigung der Schubkraft F_M , welche proportional zu dem Produkt aus orthogonalem Läufer- und Statorstromkomponenten ist [4] und welche sich hier nach dem Zusammenhang

$$F_M = -\frac{6\pi L_h}{\tau_p \ddot{u}} \cdot I_{Sd} I_{Lq} = K_M \cdot I_{Sd} I_{Lq}, \quad (2.6)$$

ermitteln läßt, ist nach Gleichung (2.5) und (2.6) Einspeisung ins Bordnetz möglich

- im untersynchronen Betrieb ($\omega_M < \omega_S$) bei treibender Kraft ($F_M > 0$) und
- im übersynchronen Betrieb ($\omega_M > \omega_S$) bei bremsender Kraft ($F_M < 0$).

Der Betrag der über den Linearmotor übertragenen Leistung ist somit zum einen von der Schubkraft F_M , welche proportional zu dem Produkt aus I_{Sd} und I_{Lq} ist, und zum anderen von der Differenzgeschwindigkeit zwischen magnetischer Wanderwelle im Stator und Geschwindigkeit des Schlittens ω_L abhängig. Berücksichtigt man, daß systembedingt die Regelung der Längsdynamik Vorrang vor der Steuerung der Energieübertragung über den Linearmotor hat, so ergeben sich zwei Freiheitsgrade zur Steuerung der über den Linearmotor übertragenen Leistung. Zum einen kann das Verhältnis der Stromamplituden zwischen Läufer und Stator verstellt werden und zum anderen kann der Wert der Statorfrequenz frei gewählt werden.

3. Regelungskonzept mit Energiemanagement

In der nachfolgenden Abbildung sind die Blöcke der Regelung des Linearmotorprüfstands, welche ein Energiemanagement zur Steuerung der über den Linearmotor übertragenen Leistung beinhalten, dargestellt. Die inneren Regelkreise der kaskadierten Regelstruktur werden aus den Stromregelungen für den Statorabschnitt und den beiden Läuferelementen gebildet. Dem überlagert ist die Geschwindigkeitsregelung angesiedelt, während in der obersten Kaskade die Positionsregelung angeordnet wird. Das Energiemanagement zur Arbeitspunkteinstellung greift hierbei genau an der Schnittstelle zwischen Geschwindigkeits- und Stromregelungen ein. Ihm wird ein Sollwert für die Schubkraft und der Sollwert der ins Bordnetz des Schlittens ein-

zuspeisenden Leistung übergeben. Hierbei beinhaltet das Energiemanagement folgende Punkte:

- Arbeitspunktbestimmung des Linearmotors
- Berechnung der Referenzfrequenz der Statorwelle unter Berücksichtigung der Spannungsgrenzen

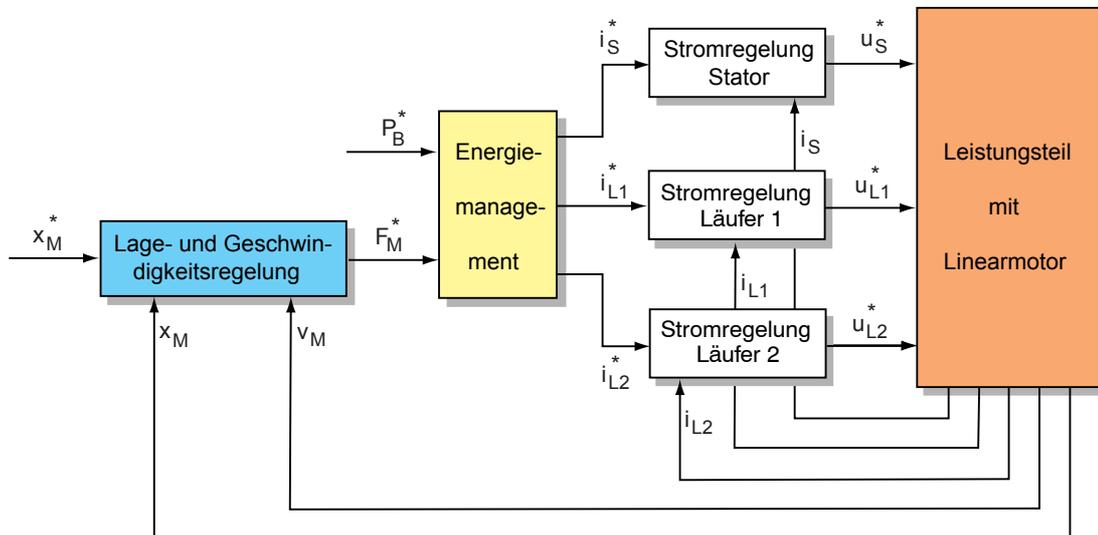


Bild 3: Regelstruktur mit Energiemanagement eines Linearmotors

3.1 Arbeitspunktbestimmung des Linearmotors

Der Arbeitspunkt des Linearmotors soll vom Energiemanagement so eingestellt werden, daß sich ein optimaler Wirkungsgrad für die Anlage ergibt. Der Wirkungsgrad η ist bei treibenden Motor nach Gleichung (3.1) definiert und berücksichtigt die mechanische Leistung P_M sowie die eingespeiste Bordnetzleistung P_B des Motors.

$$\eta = \frac{P_M + P_B}{P_S} \quad (3.1)$$

Verknüpft man Gleichungen (2.4) und (2.6) mit (3.1), so erhält man eine Beziehung des Wirkungsgrades η in Abhängigkeit des Statorstromes I_{Sd} für einen vorgegebenen Arbeitspunkt mit konstanter Geschwindigkeit V_M , Schubkraft F_M und Bordnetzleistung P_B des Schlittens:

$$\eta = \frac{2(V_M F_M + P_B) K_M^2 \tau_{P\ddot{u}} \cdot I_{Sd}^2}{3R_S K_M^2 \tau_{P\ddot{u}} \cdot I_{Sd}^4 + (2P_B K_M^2 \tau_{P\ddot{u}} - 6\pi V_M K_M) \cdot I_{Sd}^2 + 6F_M^2 \tau_{P\ddot{u}} R_L} \quad (3.2)$$

Wertet man die Beziehung (3.2) für einen festen Arbeitspunkt des Linearmotors in Abhängigkeit des stellbaren Statorstromes I_{Sd} mit $0 < I_{Sd} < I_{SdMAX}$ und des resultierenden Läuferstromes aus, so führt dies auf die nachfolgende Abbildung. Bild 4 liegt hierbei der folgende Arbeitspunkt zugrunde.

- Zu übertragende Bordnetzleistung: $P_B = 1 \text{ kW}$
- Schubkraft: $F_M = 100 \text{ N}$
- Geschwindigkeit des Läufers: $V_M = 2 \text{ m/s}$

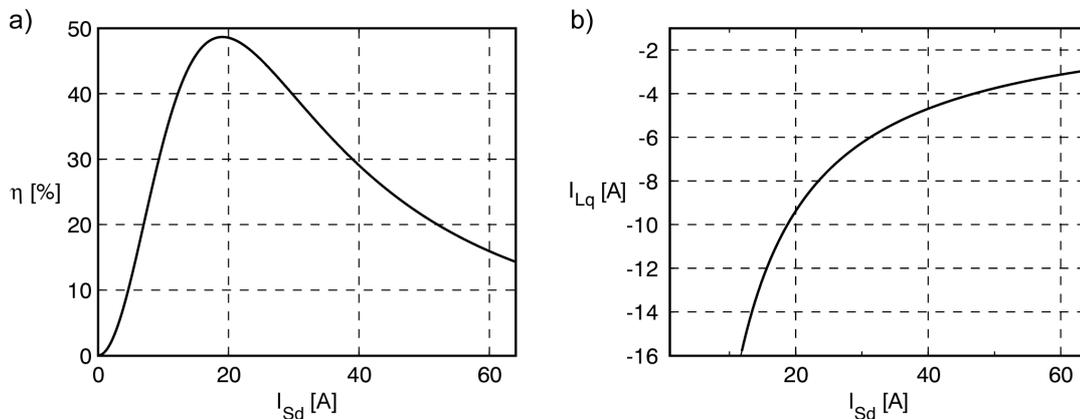


Bild 4: a) Wirkungsgrad und
b) resultierender Läuferstrom in Abhängigkeit des Statorstromes

Aus Bild 4a) ist ersichtlich, daß sich im stellbaren Bereich des Statorstromes genau ein Maximum befindet. Eine analytische Berechnung dieser Extremstelle mit (3.2) liefert die folgende Beziehungen, nach der vom Energiemanagement der Statorstromsollwert I_{Sd} vorgegeben wird.

$$I_{Sd} = \frac{\sqrt[4]{2F_M^2 K_M^2 R_L R_S^3}}{K_M R_S} \quad (3.3)$$

Ein resultierender Statorstrom I_{Sd} nach (3.3) und damit verbundener Läuferstrom I_{Lq} nach Abbildung 4b) hat zur Folge, daß bei einem Wirkungsgrad optimalen Arbeitspunkt eines Linearmotors die Kupferverluste in den beiden Läuferelementen und dem Statorabschnitt identisch sind.

3.2 Bestimmung der Referenzfrequenz der Statorwelle

Mit Hilfe der Gleichung (2.4) und dem Zusammenhang zwischen Läufer und Statorfrequenz über $\omega_S = \omega_M + \omega_L$ wird die Frequenz der Wanderwelle im Stator so eingestellt, daß die geforderte Leistung über den Linearmotor ins Bordnetz übertragen werden kann. Hierbei muß aber die Spannungsbegrenzung, bedingt durch die Zwischenkreisspannungen der elektrischen Versorgungseinheiten des Stators und der Läufer berücksichtigt werden. Dies hat zur Folge, dass bei Betrieb des Linearmotors an der Spannungsgrenze der Betrag der übertragenen Bordnetzleistung nicht weiter erhöht bzw. optimal eingestellt werden kann.

4. Versuchsergebnisse

An dem in Bild 1 beschriebenen Prüfstand konnten die in diesem Kapitel aufgeführten Meßergebnisse erzielt werden. Als Sollvorgabe sollte während des Verfahrens des Schlittens 1 kW über den Stator in die beiden Läuferelemente eingespeist werden.

Hierbei ist in Bild 4a) der zeitliche Verlauf der Istposition x_M des Schlittens während einer Hin- und Rückfahrt über den 8 m langen Verfahrensweg dargestellt. Der überschwingungsfreie Verlauf von x_M wurde durch Vorsteuerungsmaßnahmen mit einem ruckbegrenzten Lagesollprofil als Referenzfunktion erzielt [5]. Der leicht verrauschte Verlauf der Referenzschubkraft F_M^* ergibt sich durch Meßungenauigkeiten des Seilzugsensors, welcher zur Positionserfassung des Schlittens verwendet wird. Diese Störungen spiegeln sich im Verlauf des Statorstromes i_{Sd} wieder. Der Verlauf der Referenzfrequenz des Stromes im Stator f_S^* ist in Bild 4d) festgehalten. Fällt der Wert der Schubkraft des Motors unter einen Schwellwert von 50 N und ändert sich häufig sprunghaft das Vorzeichen, wird die Referenzfrequenz zu Null gesetzt, um hochfrequente Sprünge im Verlauf von f_S^* zwischen dem positiven und negativen Maximalwert zu vermeiden. Dieser Betriebszustand ergibt sich bei Verfahren mit konstanter Geschwindigkeit aufgrund der beschriebenen Störungen innerhalb der Sensorik des Aufbaus.

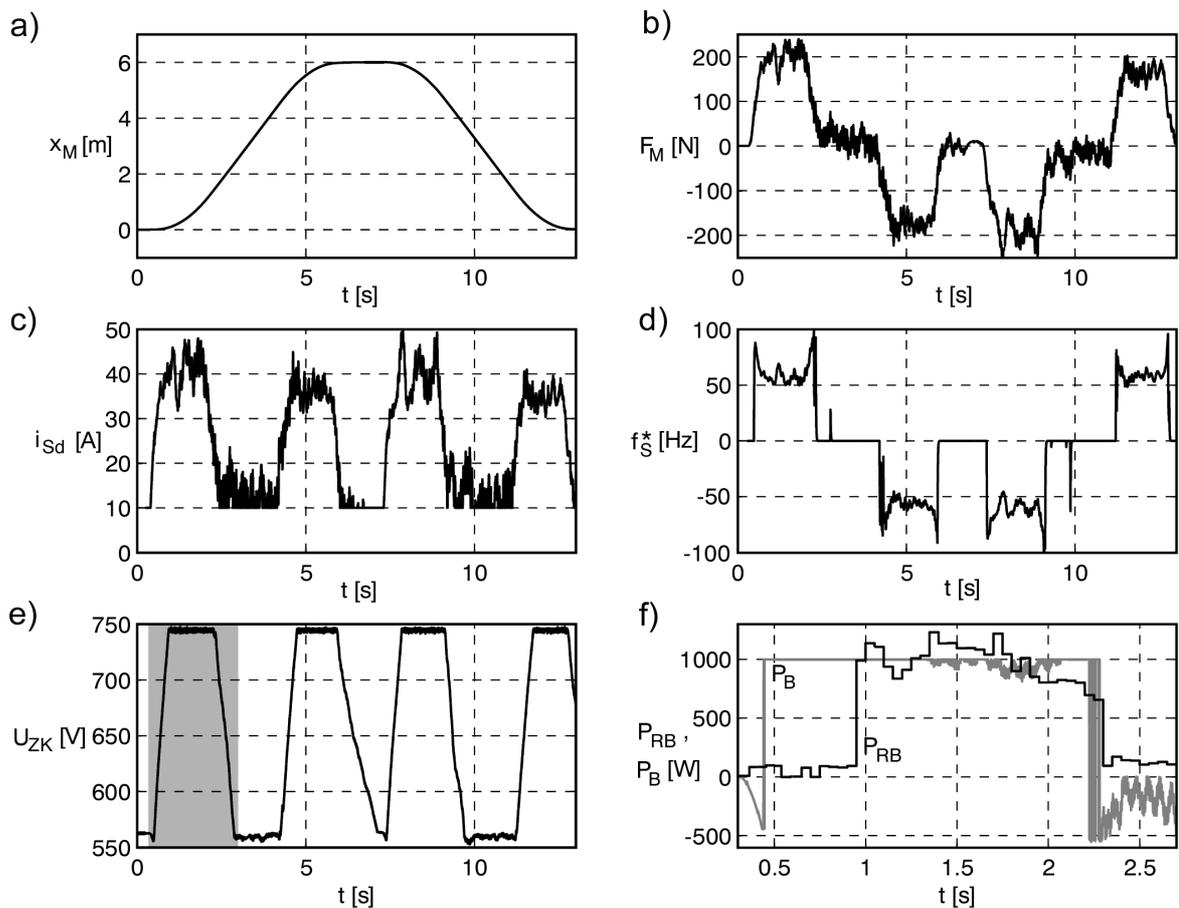


Bild 4: Experimentelles Ergebnis mit Energiemanagement

In Bild 4e) ist der zeitliche Verlauf der Zwischenkreisspannung U_{ZK} eines läuferseitigen Umrichters während der Messung dargestellt. Bei Energierückspeisung - Leistungsfluß von den Läuferelementen zurück in die Umrichter - erhöht sich die Zwischenkreisspannung der Umrichter auf bis zu 750 V. Bei Überschreitung dieser Schwelle wird dem Zwischenkreis des Umrichters ein Bremswiderstand zugeschaltet. Aus dem Verlauf der Zwischenkreisspannung wird daher deutlich, dass beim Bremsen und Beschleunigen Energie in die Läuferelemente übertragen wird.

In Bild 4f) ist zum einen der Verlauf der im Bremswiderstand umgesetzten Leistung P_{RB} während des ersten Beschleunigungsvorgangs des Schlittens, welcher in Bild 4e) grau hinterlegt ist, und zum anderen die mit Hilfe der gemessenen Ströme I_{Sd} und I_{Lq} nach (2.4) berechnete Bordnetzleistung P_B aufgeführt. Da der zeitliche Verlauf des Stromes im Bremswiderstand durch ständige Zu- und Abschaltvorgänge hochfrequente Signalanteile besitzt, wird die Momentanleistung über 50 ms gemittelt und der in dieser Spanne berechnete Mittelwert dargestellt. In dem Zeitraum zwischen 0,4 und 0,9 s werden die Zwischenkreiskondensatoren auf 750 V aufgeladen, weshalb der Wert für P_{RB} ungefähr bei Null liegt, während die theoretisch berechnete Bordnetzleistung hingegen 1 kW beträgt.

Ferner wird aber durch die in Bild 4 dargestellten Messungen deutlich, daß mit Hilfe des hier verwendeten Energiemanagements des Motors der geforderte Leistungsfluß über den Linearmotor bei ausreichend hohem Betrag der Schubkraft gesteuert werden kann.

5. Fazit und Ausblick

Mit Hilfe des vorgestellten Energiemanagements kann ein doppelt gespeister Langstator-Linearmotor nicht nur als Antrieb von Fahrzeugen in Industrieanlagen sondern auch zur Energieübertragung genutzt werden. Stromschienen oder Oberleitung zur Versorgung von Fahrzeugeinheiten, welche z.B. bei der Neuen Bahntechnik Paderborn eingesetzt werden, sind nicht mehr notwendig. Findet ferner die Regelung einer Anlage dezentral auf den Fahrzeugen statt, so kann mit Hilfe dieser Linearmotortechnik ein hochgradig automatisiertes Beförderungssystem aufgebaut werden [6].

Nachteilig wirkt sich der Zusammenhang aus, dass der Betrag der übertragenen Bordnetzleistung von dem Arbeitspunkt des Linearmotors abhängig ist und somit kein kontinuierlicher Energiefluß in die Läufer garantiert werden kann. Dies hat zur Folge, dass die Fahrzeugeinheiten Energiepuffer benötigen, welche wenn nötig Energie ins Bordnetz einspeisen, um später über den Linearmotor wieder aufgeladen werden zu können.

Die Optimierung des Ladezustands dieses Energiepuffers muß bei nachfolgenden Untersuchungen noch in das aufgeführte Energiemanagement integriert werden.

Weiterführende Untersuchungen hierzu werden ab 2003 an einer 530 m langen Teststrecke der NBP durchgeführt werden.

Dank sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft gesagt für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614.

6. Literatur

- [1] B. Yang, M. Henke, H. Grotstollen: „Realization of Pitch Control on the Test Stand for NBP Wheel-on-Rail System“, LDIA2001, Nagano 2001, S. 337 - 341.
- [2] M. Henke, H. Grotstollen: „Regelung eines Langstatorlinearmotors für ein spurgeführtes Bahnfahrzeug“, SPS/IPC drives '99, Nürnberg 1999, S. 775-782.
- [3] M. Henke, H. Grotstollen: „Control of a Linear Drive Test Stand for the NBP Railway Carriage“, LDIA 2001, Nagano Japan, pp. 332 - 336.
- [4] K. Vogt: „Berechnung elektrischer Maschinen“, VCH, Weinheim 1996.
- [5] G. Ketterer: „Automatisierte Inbetriebnahme elektromechanischer, elastischgekoppelter Bewegungsachsen“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1995.
- [6] A. Pottharst, M. Henke, H. Grotstollen: „Power Supply Concept of the Longstator-Linear Motor of the NBP-Test Track“, EPE-PEMC 2002 Dubrovnik & Cavtat