

Das Linearantriebssystem der NBP-Versuchsanlage

Bernd Schulz, Bo Yang, Andreas Pottharst,
Horst Grotstollen

University of Paderborn
Department of Power Electronics and electrical Drives

Warburger Str. 100, D-33098 Paderborn, Germany

Email: schulz@lea.upb.de

Abstract: The Linear Drive System of the NBP-Test Track – The NBP (Neue Bahntechnik Paderborn) project has been established at the University of Paderborn seven years ago and a test track in scale 1:2.5 is used for investigations on railway vehicles (shuttles) driven by linear motors. The linear drive is part of a complex mechatronic system with a modular design. The control structure of this railway system is based on the operation of autonomous shuttles which are fitted with individual power management on board. The drive control of one shuttle is realized with a cascaded structure consisting of position, speed and current control.

Keywords: Linear drive, Railway system, Drive Control, NBP, Railcab

1 Einleitung

Die Universität Paderborn betreibt seit 1997 ein Forschungsgruppen übergreifendes Projekt, das sich zum Ziel gesetzt hat, ein neuartiges Bahnkonzept zu entwickeln. Dieses Projekt mit dem Namen „Neue Bahntechnik Paderborn (NBP)“ strebt grundlegend neue Wege in Technik und Betrieb des Schienenverkehrs an. Die bisher üblichen Züge, aus einem Triebwagen und einigen Waggons, werden in diesem System durch einzelne kleine autonom fahrende Shuttlefahrzeuge – den so genannten Railcabs – ersetzt. Dadurch lässt sich der Schienenverkehr deutlich bedarfsorientierter gestalten. Auf viel befahrenen Streckenabschnitten können sich diese kleinen Shuttles selbstständig zu losen Verbänden zusammenfinden und solange, wie es sinnvoll ist, als Konvoi den Windschatten des vorausfahrenden Fahrzeuges ausnutzen. Dabei werden alle Entscheidungen, z.B. ob ein Konvoi gebildet werden soll oder auf welchem Weg der Zielort am günstigsten zu erreichen ist, auf dem Shuttle getroffen.

Da die einzelnen Shuttles klein sind und sich autonom im Streckennetz bewegen können, ist es nahe liegend, mit ihnen Ziel reine Punkt-zu-Punkt Verbindungen zu realisieren. Dabei entfällt für die Passagiere das zeitintensive Umsteigen und Warten auf den nächsten Zug. So kann dieses System auch bei relativ niedrigen Spitzengeschwindigkeiten von ca. 160 km/h eine hohe Durchschnittsgeschwindigkeit erreichen.

Bei der Einführung eines neuen Systems ist es häufig sinnvoll, das bestehende System einzubinden. Daher wird bei dem NBP-Konzept ausgehend von der üblichen Bahntrasse der Schienenweg um einen Linearmotor ergänzt. Dieser Linearmotor ist ein wesentlicher Bestandteil des neuen Verkehrssystems. Er ermöglicht sowohl das sichere Zusammenschließen der Shuttles zu Konvois, als auch ein besonders verschleißarmes Fahren.

Neben der neuen Technologie ist eine moderne Strategie bei der Entwicklung von großer Bedeutung. Daher werden im Rahmen des NBP-Projekts die Teilsysteme wie in der Mechatronik üblich modular entworfen.

Zur Untersuchung dieses Systems wurde eine Versuchsanlage (s. Abbildung 1) aufgebaut, die es ermöglicht, sowohl den Antrieb, dessen Regelung als auch die übrigen mechatronischen Systeme wie z.B. das Fahrwerk zu untersuchen. Dabei wurden die einzelnen Module, wie z.B. das Antriebsbremsmodul, zuvor an entsprechenden Prüfständen erprobt.



Abbildung 1: Foto der NBP-Teststrecke mit Versuchsfahrzeug

Trasse räumlich zusammengefasst. Dies dezentrale Antriebssystem erfordert in Hinblick auf die Regelungen sowie die Betriebsleittechnik völlig neue Ansätze.

So müssen die Fahrmanöver des Shuttles mit der Trasse koordiniert werden. Zur Kopplung der fahrzeugseitigen Regelungen mit den Stromregelungen auf der Streckenseite wurde eine Funkkommunikation realisiert, durch die alle relevanten Vorgaben des Shuttles an den streckenseitigen Betriebsleitreechner übermittelt werden. Die Verteilung der Informationen auf die zu aktivierenden Streckenstromrichter erfolgt mittels eines Feldbusses.

Neben den aktiven mit Drehstromwicklungen ausgestatteten Bereichen der Versuchsstrecke sind auch passive Bereiche, die lediglich aus einer Reaktionschiene (ähnlich einem Kurzschlussläufer) bestehen, realisiert worden. Diese passive Lösung bietet sich aus wirtschaftlichen Überlegungen insbesondere für wenig befahrene Trassen und aus konstruktiven Gründen im Weichenbereich an. Im Gegensatz zu den aktiven Streckenabschnitten ist dort keine Energieversorgung des Fahrzeuges über den Linearmotor möglich.

3 Die NBP-Shuttles als modulare Systeme

Bei der Entwicklung des NBP-Systems erfolgt der Entwurf modular und orientiert sich an den Funktionen der einzelnen Teilsysteme. Dadurch lassen sich die Entwicklungen von so umfangreichen Systemen wie die der NBP deutlich besser strukturieren und schließlich moderne Fertigungsverfahren anwenden. Das System wird somit mit den aus der Mechatronik bekannten Entwurfsmethoden entwickelt.

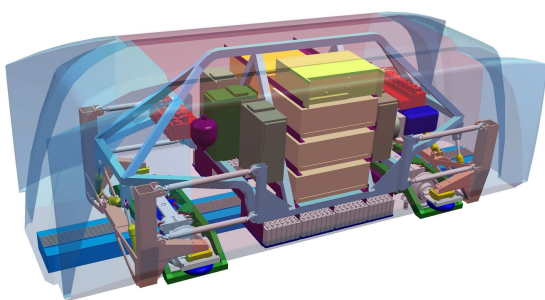


Abbildung 3: NBP-Versuchsfahrzeug

Das modular hierarchische Konzept der NBP wird insbesondere bei der Entwicklung und dem Aufbau der Shuttles (s. Abbildung 3) deutlich.

Dabei werden die wesentlichen Funktionen Tragen, Führen und Antreiben unterschieden und als Struktur für das modulare System aufgefasst.

Die Funktion des Tragens wird durch einen in Leichtbauweise ausgeführten Rahmen (Space Frame) und in Verbindung mit der klassischen Rad-Schiene-Technik realisiert.

Die Funktionen Führen und Antreiben werden durch die Fahrmodule der Shuttles erfüllt. Darüber hinaus werden in den Fahrmodulen zusätzlich, durch eine aktive Feder-Neigetechnik, die Sicherheit und der Fahrkomfort erhöht.

Das Fahrmodul gliedert sich daher in die in Abbildung 4 dargestellten mechatronischen Funktionsmodule.

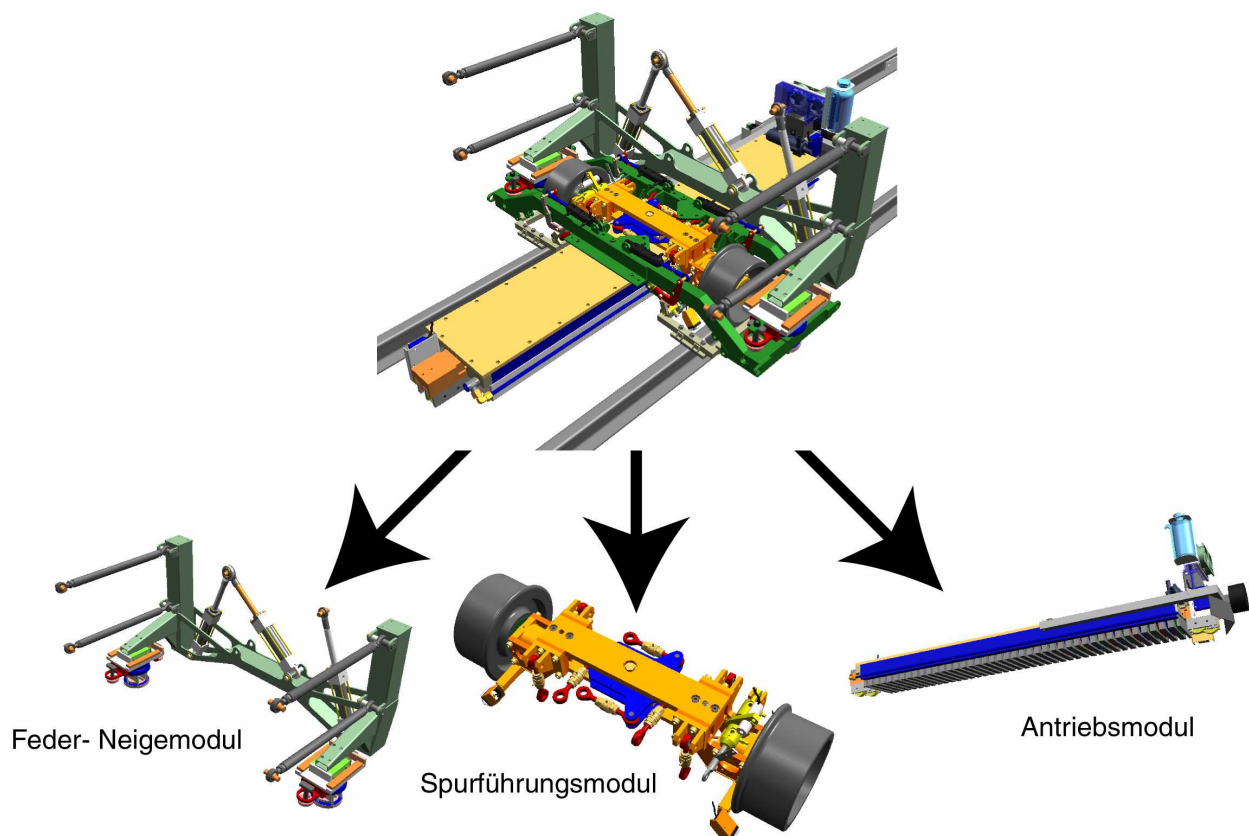


Abbildung 4: Funktionsmodule des Fahrmoduls

Die Läuferelemente im Antriebsmodul werden neben ihrer Hauptfunktion auch für die Energieübertragung von der Trasse zum Shuttle benutzt. Dies ist nur aufgrund der doppelt gespeisten Ausführung des Linearmotors möglich.

Neben den genannten Funktionsmodulen gibt es im Shuttle eine Vielzahl anderer Module z.B. das Energieversorgungsmodul, welches als Energiepuffer für die vom Linearmotor übertragene Energie dient.

4 Motorprinzipien

Der Antrieb, der im Rahmen der Neuen Bahntechnik Paderborn untersucht wird, ist als doppelt gespeister Langstatorlinearmotor ausgeführt. D.h. sowohl die Primär- als auch Sekundärteile besitzen jeweils dreiphasige Drehstromwicklungen. Durch diese Art der Ausführung lassen sich unterschiedliche Betriebsweisen realisieren.

Außerdem lassen die fahrzeugseitigen Drehstromwicklungen, in entsprechend ausgestatteten Bereichen der Versuchsanlage, einen Betrieb als Asynchronkurzschlussmaschine zu. Diese Variante des Linearmotors wird auf der NBP-Versuchsanlage aus konstruktiven Gründen im Weichenbereich eingesetzt, da hier die Räder des Shuttles durch die Trasse geführt werden müssen. Außerdem ist ein Teilstück des Zubringers mit Reaktionsschienen ausgestattet, um hier Untersuchungen zur Kurzstator-Antriebsregelung durchführen zu können. Wenn das NBP-System als Verkehrssystem eingesetzt werden soll, dann eignen sich die Reaktionsschienen, aus wirtschaftlichen Gründen, besonders für wenig befahrene Strecken, da hier die streckenseitigen Investitionskosten gering sind.

Kurzstatorprinzip

In den Bereichen der Versuchsstrecke, in denen der Linearmotor als Asynchronkurzschlussmaschine betrieben werden soll, sind auf der Streckenseite passive Reaktionsschienen erforderlich. Die Reaktionsschienen bestehen aus einem elektrisch gut leitenden (Kupfer, Aluminium) und einem ferromagnetischen Material (Eisen). In die Reaktionsschienen werden, wie bei einer Kurzschluss-

maschine üblich, durch die Relativgeschwindigkeit des erregenden Magnetfeldes Ströme induziert.

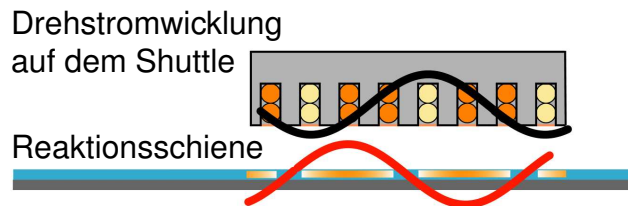


Abbildung 5: Wirkungsweise Kurzstatorprinzip

Bei der für das NBP-System gewählten Realisierungsform befindet sich die Drehstromwicklung, die das erregende Magnetfeld erzeugt, allerdings auf dem Läufer und der Stator ist passiv (vgl. Abbildung 5). Das Funktionsprinzip kehrt sich um und wird daher als Kurzstatorprinzip bezeichnet. Die Energie, die das Fahrzeug für den Vortrieb benötigt, muss bei dem Kurzstatorprinzip auf der Shuttleseite bereitgestellt werden. Die maximal erzielbare Vorschubkraft beträgt auf der Versuchsanlage ca. 25 % der Vorschubkraft, die sich in Bereichen mit aktiven Stator (Langstatorbetrieb) erzielen lässt.

Langstatorbetrieb

Der Großteil der NBP-Versuchsstrecke ist mit einem aktiven Stator ausgestattet. Durch die Drehstromwicklungen, die sowohl auf dem Shuttle als auch in der Versuchsstrecke zur Anwendung kommen, lässt sich sowohl ein synchroner als auch ein asynchroner Betrieb realisieren.

Der Fall des synchronen Betriebs des doppelt gespeisten Linearmotors ist für das NBP-System allerdings nur von untergeordneter Bedeutung, da in diesem Fall keine Relativbewegungen zwischen mehreren Shuttles möglich ist und daher die Möglichkeit der dynamischen Konvoibildung ausgeschlossen ist.

Der asynchrone Betrieb des Linearmotors (s. Abbildung 6) stellt den wichtigsten Fall für den NBP-Antrieb dar. Denn so ist es möglich sowohl Konvois zubilden als auch Energie über den Linearmotor zum Shuttle zu übertragen [1].

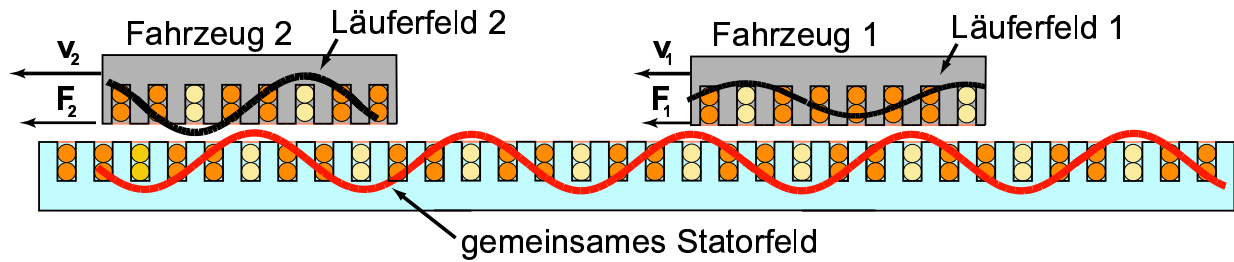


Abbildung 6: Langstatorprinzip

Für die Regelung von mehreren Fahrzeugen, die sich wie in Abbildung 6 über einem gemeinsamen Statorfeld befinden, ist es zweckmäßig, wenn alle Regelungen dasselbe Bezugssystem benutzen. Hierzu bietet sich ein statorstromorientiertes Koordinatensystem an (s. Abbildung 7), da nur der Statorstrom für die Kraftwirkung aller Läuferelemente gleich ist.

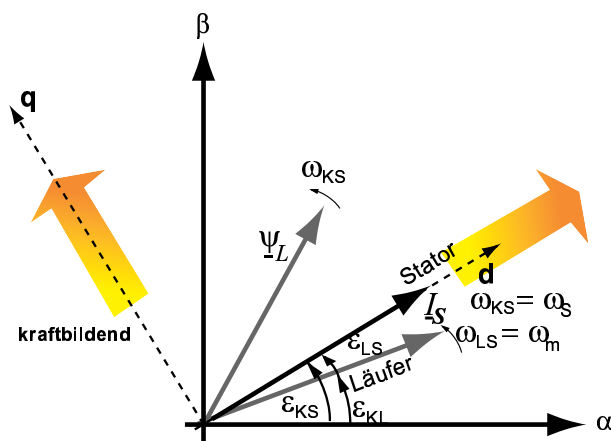


Abbildung 7: Statorstromkoordinatensystem

In diesen Koordinaten kann die entstehende Kraft wie in Gleichung (1) angegeben werden.

$$F_m = \frac{6\pi L_m}{2\tau_p} I_S I_{Lq} \quad (1)$$

Dabei stellt L_m die Koppelinduktivität zwischen Stator und Läufer, τ_p die Polteilung, I_L die Raumzeigeramplitude des Läuferstroms und I_S die Raumzeigeramplitude des Statorstroms dar. Der Statorstrom I_S besteht definitionsgemäß aus einer d-Komponente, während der Läuferstrom I_L lediglich

mit seiner q-Komponente zur Kraftbildung beiträgt. Ausgehend von dieser Beziehung können die für die Antriebstechnik relevanten Regelkreise aufgebaut werden.

5 Regelungskonzepte des doppelt gespeisten Linearmotors

Die Struktur der Regelungen und Steuerungen des NBP-Systems gliedert sich in mehrere Hierarchieebenen. Außer den zentralen Funktionen der Betriebsleittechnik sind alle anderen Aufgaben dezentral realisiert. D.h. die Stromregelung für den Stator erfolgen auf der Streckenseite. Die Läuferstromregelungen befinden sich zusammen mit der Geschwindigkeits- und Positionsregelung auf dem Shuttle.

Abbildung 8 zeigt den Wirkungsplan der Antriebsregelung für den Langstatorbetrieb eines Einzelachsfahrmoduls. Die Statorstromregelung erfolgt in (d-q)-Koordinaten, die mit einer durch das Shuttle vorgegebenen Frequenz umlaufen. Die dazu erforderliche Koordinatentransformation von (d, q) auf die Stranggrößen in (a, b, c)-Koordinaten erfolgt bei der Vorgabe der Stellgröße für den Pulsbreitenmodulator des Wechselrichters. Vor der Transformation werden die Stellgrößen, also die Sollspannungen, begrenzt.

Für die Regler des d- bzw. q-Zweigs kommen PI-Regler zum Einsatz, die nach dem Verfahren der Doppelverhältnisse [2] dimensioniert werden. Die Stromregelungen für die beiden Läuferhälften eines Fahrmoduls sind denen auf der Statorseite ähnlich. Lediglich eine zusätzliche Entkoppelung, für die Berücksichtigung der mechanischen Geschwindigkeit des Läufers, unterscheidet Läufer- und Statorstromregelungen. Alle drei Stromregelungen beziehen ihre Sollwerte aus den übergeordneten Regelkreisen.

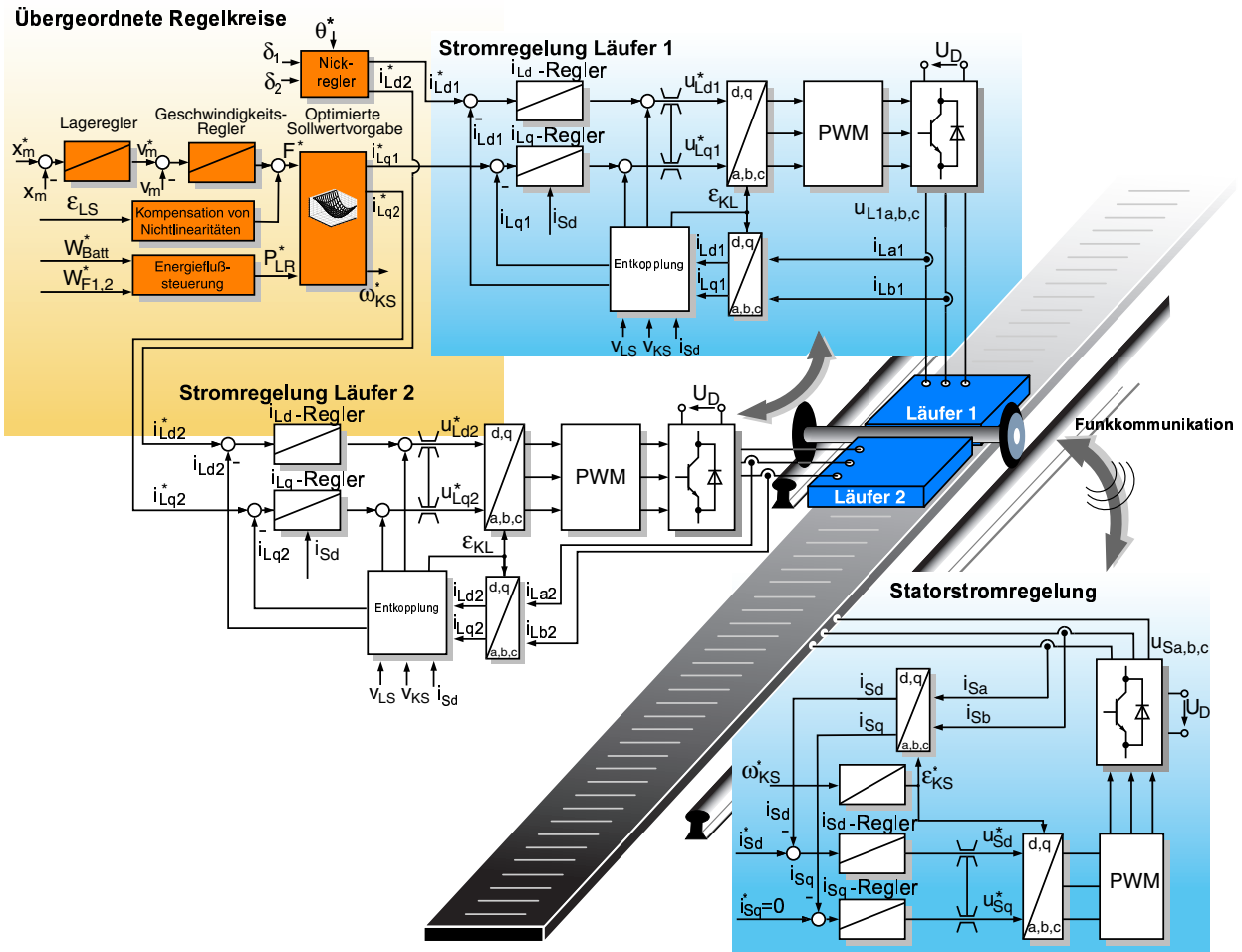


Abbildung 8: Wirkungsplan der Antriebsregelung

Synchronisation von Läufer- und Statorströmen

Wesentlich für die Kraftbildung ist die Ausrichtung von Läufer- und Statorstrom zueinander. Um eine verlustoptimale Phasenlage von 90° zu gewährleisten, ist es erforderlich, die Ströme zeitlich und räumlich zu synchronisieren.

Für den einfachsten Betriebsfall, einer stehenden Statorwelle ($f_{Stator} = 0$), liegt lediglich eine Ortsabhängigkeit der Statorstrombelagswelle vor, die durch die Polteilung τ_p bestimmt wird. In diesem Fall muss der Läuferstrombelag immer um den Betrag verschoben werden, der einer evtl. Bewegung des Fahrzeuges entspricht. Daher wurden in die Räder des NBP-Versuchsfahrzeuges Inkrementalgeber zur Positionserfassung integriert. Allerdings ist durch den bei Spurkranzanläufen auftretenden Schlupf sowie den Sinuslauf der Räder diese Art der Positionserfassung als umso unsicherer anzusehen, je weiter das Fahrzeug

gefahren ist. Um die Positionserfassung dennoch ausreichend genau zu halten, wurde das System mit einem zusätzlichen Näherungsschalter ausgestattet, der bei auf der Trasse angebrachten Referenzpositionen den Absolutwert der Position, des Fahrzeuges und damit auch der Läuferstrom-belagswelle korrigiert.

Wenn der Stator statt der stehenden Statorwelle eine Wanderwelle erzeugen soll, dann ist zusätzlich zur Positionserfassung eine zeitliche Abstimmung der beiden Ströme erforderlich. Dies kann durch eine synchronisierte Kommunikation zwischen Shuttle und Versuchsstrecke erfolgen. Dazu muss neben den Sollwerten für die Amplitude und Frequenz auch die Phasenlage für den Statorstrom zu einem bestimmten Zeitpunkt vom Shuttle zur Strecke übertragen werden. In diesem Zusammenhang sind insbesondere die Totzeiten der Funkkommunikation zur und der Feldbuskommunikation auf der Versuchsstrecke von entscheidender Bedeutung. Da die Stromregler, bei vorgegebener Frequenz, die Strombelagswelle selbstständig weiter stellen, führt jede nicht berücksichtigte Totzeit zu einem Phasenfehler der Ströme und wirkt sich daher negativ auf die Kraftbildung aus.

Eine weitere Möglichkeit, die allerdings bisher noch nicht vollständig auf der Versuchsanlage implementiert ist, stellt die messtechnische Erfassung der Statormagnetwelle dar. Dazu werden vor den Läuferelementen des Versuchsfahrzeuges mehrere Sensoren, über eine Polteilung verteilt, angebracht. Mit diesen Sensoren und der passenden Informationsverarbeitung kann direkt auf dem Shuttle der Läuferstrombelag eingestellt werden. Eine zusätzliche synchrone Kommunikation sowie eine besonders genaue Positionserfassung wären somit nicht erforderlich.

Ziel ist es jedoch, auf zusätzliche Sensorik zu verzichten und diese durch Lageschätzverfahren zu ersetzen. Dazu wurden in [3] zwei Verfahren untersucht und an einem Linearmotorprüfstand erfolgreich implementiert. Allerdings erfordern die dort vorgestellten Verfahren eine umfangreiche Kommunikation zwischen Stator- und Läuferstromregelung, sie sind daher nicht direkt auf die NBP-Versuchsanlage übertragbar.

Übergeordnete Regelungen

Die der Stromregelung des Motors überlagerten Kreise bestehen aus einem Profilgenerator und einer Arbeitspunktvorgabe für den Linearmotor. Der Profilgenerator berechnet in Abhängigkeit von der Sollposition des Shuttles ein ruckbegrenztes Sollprofil [4], wodurch zeitabhängige Sollwerte für Position- und Geschwindigkeitsregelung vorgegeben werden können. Diese Profile werden auch zur Vorsteuerung genutzt. Wobei die Vorsteuerung zur Erhöhung der Dynamik des Antriebssystems dient.

Im Block „Sollwertvorgabe“ (s. Abbildung 8), werden aus den Sollwerten für die Schubkraft und die in das Bordnetz einzuspeisende Leistung, die Sollwerte für die Motorströme bestimmt.

Da die Schubkraft des Linearmotors proportional zu dem Produkt aus orthogonalem Läufer- und Statorstrom ist, kann die Aufteilung auf Läufer und Stator frei gewählt werden. Unter Berücksichtigung der Spannungsbegrenzungen der Leistungselektronik von Stator und Läufer wird, als zusätzlicher Freiheitsgrad der Sollwert für die Frequenz der Wanderwelle im Stator berechnet. So kann der Motor zum einen die geforderte Schubkraft aufbauen und zum anderen die vorgegebene Leistung ins Shuttle übertragen. Um einen minimalen Energieverbrauch des Motors erzielen zu können, werden hierbei wirkungsgradoptimale Verfahren zur Arbeitsvorgabe eingesetzt [1].

Nickregelung der Läuferelemente

Zu den in Abbildung 8 dargestellten überlagerten Regelkreisen gehört auch die Nickregelung. Ihre Aufgabe ist es die Nickbewegung, die durch Vortriebs- und Normalkraft hervorgerufen wird (s. Abbildung 9), zu unterdrücken und das Läuferelement in der eigentlich instabilen Gleichgewichtslage zu halten.

Hierzu existieren zwei unterschiedliche Ansätze [5]. So kann die Nickregelung entweder entkoppelt oder aber mit der Schubkraftregelung gekoppelt realisiert werden.

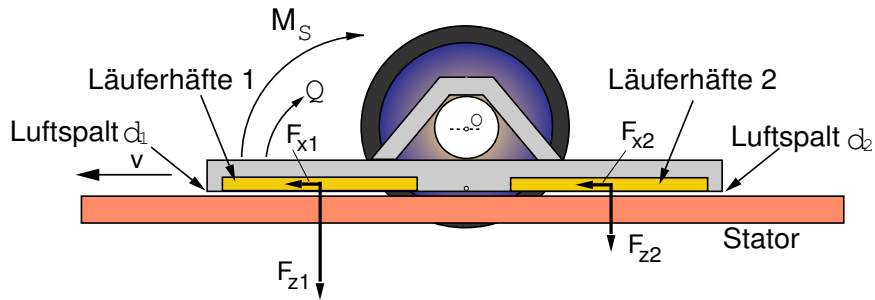


Abbildung 9: Antriebsmodul am Einzelachsfahrwerk

Bei der entkoppelten Nickregelung wird die q-Komponente des Läuferstromes wie üblich zur Schubkraftbildung benutzt und die d-Komponente zum Stellen der in den Läuferhälften für das Ausregeln des Nickmomentes erforderlichen Normalkräfte genutzt. Dadurch kann die Schubkraftregelung unabhängig von der Nickregelung ausgelegt und betrieben werden. Nachteilhaft ist in diesem Fall, dass die d-Komponente des Läuferstroms nicht wie üblich zu null geregelt werden kann. Deshalb reduziert sich der maximal für die Kraftbildung stellbare Motorstrom und damit auch die maximal erzielbare Schubkraft.

Bei der gekoppelten Nickregelung wird alleine die q-Komponente des Läuferstroms zur Kraftbildung herangezogen, d.h. die d-Komponente wie allgemein üblich zu null geregelt. Daher muss mit der q-Komponente des Läuferstromes sowohl die Schubkraft gebildet sowie das entstehende Nickmoment kompensiert werden. Dies geschieht durch eine Aufteilung der zu erzeugenden Schubkraft auf die beiden Läuferhälften und Vorgabe eines zusätzlichen gegensinnig wirkenden Anteils, der durch einen Nickregler vorgegeben wird. Gleichung (2) zeigt, wie sich die Vorgaben für die Läuferstromregler aus den Anforderungen der Nickregelung und Kraftregelung für die einzelnen Läuferhälften ergeben.

$$\begin{aligned} i_{L1q} &= i_{LqSchub} / 2 + \Delta i_{LqNick} \\ i_{L2q} &= i_{LqSchub} / 2 - \Delta i_{LqNick} \end{aligned} \quad (2)$$

Da sich die Schubkraft additiv aus den beiden Kräften, die durch die Läuferströme i_{L1q} und i_{L2q} erzeugt werden, ergeben, bleibt die Vorgabe des Schubkraftreglers insgesamt unverändert.

Es sollte allerdings sichergestellt werden, dass die beiden Läuferhälften nicht gegeneinander arbeiten. Daher müssen die Vorgaben der Nickregelung immer kleiner sein als die der Läuferstromregelung. Somit lässt sich dieses Verfahren lediglich bei hinreichend großer Schubkraftanforderung sinnvoll betreiben.

Durch Messungen an einem Versuchsstand wurde deutlich, dass bei einer hinreichend großen Schubkraftanforderung die gekoppelte Nickregelung der entkoppelten vorzuziehen ist. In diesem Fall können die Verluste im Läufer klein gehalten und dennoch eine große Schubkraft erzielt werden. Da jedoch, bei zu kleinen Schubkraftanforderungen, der Nickwinkel nicht ausgeregelt werden kann, ist eine Kombination der beiden Verfahren notwendig.

Da die Nickregelung für die Betriebssicherheit des Shuttles entscheidend ist und sie außerdem direkt die Vorgabe der Ströme beeinflusst, ist sie als übergeordnete Regelung anzusehen.

6 Zusammenfassung

Die vorgestellten Regelungen, sind als Teile eines sehr umfangreichen Gesamtsystems zu sehen. Daher stehen in Zukunft nicht die mechatronischen Teilsysteme mit ihren Regelungskonzepten im Vordergrund, sondern vielmehr das Zusammenspiel und die Wechselwirkungen aller Funktionsmodule des NBP-Systems. So wird zukünftig z.B. das Energiemanagement in Hinblick auf seinen Einfluss auf andere Funktionsmodule wie z.B. die Feder-Neigetechnik oder die Spurführung näher untersucht. Hier werden Belastungsprognosen neben den Regelungsstrategien für das Bordnetz einen wesentlichen Anteil am Energiemanagement haben.

Ebenso muss die Motorregelung bezüglich der Wechselwirkungen zu den anderen Funktionsmodulen eine ausreichende Robustheit erhalten. So kann es beispielsweise durch die aktive Spurführung dazu kommen, dass der Läufer teilweise über den Stator weggedreht wird und sich dadurch die Koppelinduktivität des Linearmotors ändert. Auch sind Umwelteinflüsse, wie z.B. Wind oder Temperaturschwankungen für die Regelung des Antriebs von Interesse.

7 Literatur

- [1] Pottharst, A., Grotstollen, H.: *Konzept zur berührungslosen Energieübertragung mit doppeltgespeistem Langstatorlinearmotor*, SPS/IPC/DRIVES Nürnberg 2003

- [2] Naslin, P.: *Dynamik linearer und nichtlinearer System*, R. Oldenbourg Verlag, Wien 1968

- [3] Henke, M.: *Antrieb mit doppeltgespeistem Linearmotor für ein Spurgeführtes Bahnfahrzeug*, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr.: 533, 2003

- [4] Ketter, G.: *Automatisierte Inbetriebnahme elektromechanischer, elastisch gekoppelter Bewegungsachsen*, Springer Verlag, Berlin 1995

- [5] Yang B., Meyer M., Grotstollen H.: *Coupled pitch and velocity control of a doubly-fed linear motor*, ISICT Peking 2003