

Regelung eines Langstator-Linearmotors für ein spurgeführtes Bahnfahrzeug

Dipl.-Ing. Markus Henke, Prof. Dr.-Ing. Horst Grotstollen
Universität Paderborn, FB 14, Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik,
Pohlweg 47-49, 33098 Paderborn
Tel.:++49-5251-603653, Fax:++49-5251-603443, Email:henke@lea.uni-paderborn.de

1. Einführung

In herkömmlichen Bahnsystemen werden die Funktionen Tragen, Führen, Bremsen und Beschleunigen durch den Rad/Schiene Kontakt realisiert. Hiermit verbunden sind ein hoher Verschleiß der Räder und ein ungenügender Kraftschluß bei nasser oder vereister Schiene. Die ungefederten Massen der rotierenden Maschinen führen zu starken Belastungen von Drehgestell und Fahrwerk.

Der Kerngedanke bei dem in einem Projekt¹ an der Universität Paderborn behandelten Bahnfahrzeug ist es, den Antrieb nicht mehr über die Räder zu realisieren, sondern durch einen Synchron-Langstator-Linearmotor, der in das bestehende Schienensystem integriert wird. Das führt zur Entkopplung des Antriebs von der Trag- und Föhrfunktion. Dieses translatorische Antriebskonzept findet bereits bei Transportsystemen und Werkzeugmaschinen Verwendung, dort werden häufig Kurzstator-Linearmotoren verwendet.

Mit dem Einsatz des Linearmotors wird eine beröhrungslose, direkte Kraftübertragung auf den Läufer, unabhängig von Kontaktflächen realisiert. Lediglich die zur Spurföhrung nötigen mechanischen Komponenten verursachen Reibverluste.

2. Systemanforderungen

Wird im Sekundärteil das Erregerfeld bereitgestellt und die Schubkraft über den Statorstrom nach Vorgabe übergeordneter Regelkreise für Geschwindigkeit und Längsdynamik geregelt, so kann lediglich ein Läufer je Statorabschnitt angetrieben werden [1],[3],[5]. Werden mehrere Statorsegmente von einer Umrichtereinheit gespeist, so ist der minimale Läuferabstand durch die Anzahl der Statorsegmente je Umrichtereinheit festgelegt. Eine Statorweilerschaltung gewährleistet den effizienten Energieeinsatz. Um höhere Flexibilität in der Fahrzeugbewegung zu erzielen, soll hier nun eine Relativbewegung zwischen verschiedenen Fahrzeugen auf gleichem Stator ermöglicht werden. Diese Forderung stellt hohe Ansprüche an Stellglieder, Regelungs- und Informationsverarbeitungseinheiten.

¹ Das Projekt „Neue Bahntechnik Paderborn“ wird gefördert vom Land Nordrhein Westfalen und von der Universität Paderborn. Es handelt sich um ein Gemeinschaftsprojekt mit Fachgruppen des Fachbereichs Maschinentechnik der Universität Paderborn.

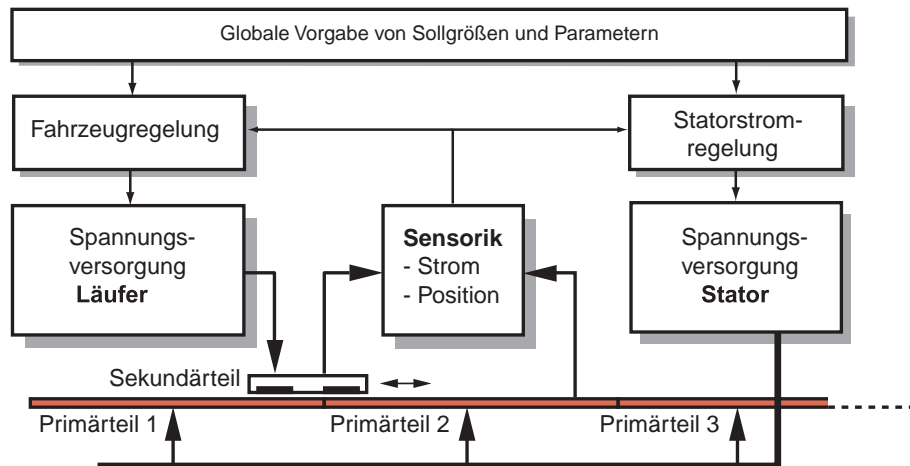


Bild 1 : Struktur des Antriebssystems

Ein synchron arbeitender Langstator-Linearmotor kann die geforderte Relativbewegung nicht leisten, daher wird hier das Sekundärteil im Fahrzeug durch eine Drehstromwicklung gebildet. Damit kann der Erregerfluß relativ zur Fahrzeugposition variiert werden. Asynchroner Betrieb wird ermöglicht. Die eigentliche Schubregelung findet im Fahrzeug statt und der Motor wird doppeltgespeist [4]. Dem Stator wird ein in Frequenz und Amplitude konstanter Strom eingepreßt. Hiermit bildet der Stator im Gegensatz zu herkömmlichen Systemen eine passive, Einheit, dessen Strom während des Betriebs auf konstante Größen geregelt werden muß [2].

3. Bezugssystem

Die Regelung der Flüsse in den Sekundärteilen muß in einem einheitlichen Koordinatensystem erfolgen. Gemeinsam ist dem Stator und den Läufern die Position des Statorstromes, da die Statorflußverkettung auch vom Läuferstrom abhängt. Die Orientierung des verwendeten Koordinatensystems wird somit am Statorstrom vorgenommen (Bild 2). Das Modell des Sekundärteils im Fahrzeug wird statorstromorientiert aufgebaut, der Statorstromzeiger bildet die d-Achse und es gilt : $i_{sq} = 0$.

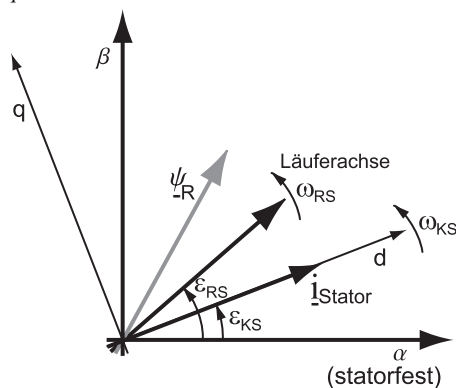


Bild 2: Statorstromorientiertes Koordinatensystem

4. Modellierung des Linearmotors

Die Maschinengleichungen des doppelgespeisten Linearmotors lehnen sich an den Asynchron-Linearmotor an.

Hierbei sind

v_{RS} : Mechanische Geschwindigkeit des Läufers

ω_{KS} : Kreisfrequenz des Statorstroms

und es gilt: $\omega_{RS} + \omega_{KR} = \omega_{KS}$

Für die Spannungsbildung in Ständer und Rotor gilt bei Eliminierung der Rotorströme :

$$\sigma L_S \cdot \frac{d\underline{i}_S}{dt} + \rho \cdot R_S \cdot \underline{i}_S = \underline{u}_S - \frac{L_h}{L_R} \cdot \underline{u}_R + \frac{L_h R_R}{L_R^2} \underline{\psi}_R - j\omega_{KS} \cdot \sigma L_S \cdot \underline{i}_S - j\omega_{RS} \frac{L_h}{L_R} \cdot \underline{\psi}_R \quad (1)$$

Zur Transformation der Gleichung (1) in das statorstromorientierte Koordinatensystem wird (1) in Real- und Imaginärteil zerlegt. Man erhält für den Realteil:

$$\frac{di_{Sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_S} \cdot \left[-\rho \cdot R_S \cdot i_{Sd} + u_{Sd} - \frac{L_h}{L_R} \cdot u_{Rd} + \frac{L_h R_R}{L_R^2} \psi_{Rd} + \omega_{RS} \frac{L_h}{L_R} \cdot \psi_{Rq} \right] \quad (2)$$

Aus der Orientierung am Statorstrom ergibt sich $i_{Sq} = 0$. Damit lautet der Imaginärteil der Gleichung (1)

$$\frac{di_{Sq}}{dt} = 0 = u_{Sq} - \frac{L_h}{L_R} \cdot u_{Rq} + \frac{L_h R_R}{L_R^2} \psi_{Rq} - \omega_{KS} \cdot \sigma L_S \cdot i_{Sd} - \omega_{RS} \frac{L_h}{L_R} \cdot \psi_{Rd} \quad (3)$$

Für die Kreisfrequenz des Statorstromes erhält man aus (3)

$$\omega_{KS} = \frac{1}{\sigma L_S \cdot i_{Sd}} \left[u_{Sq} - \frac{L_h}{L_R} \cdot u_{Rq} + \frac{L_h R_R}{L_R^2} \psi_{Rq} - \omega_{RS} \frac{L_h}{L_R} \cdot \psi_{Rd} \right] \quad (4)$$

Gleichungen (1) bis (4) beschreiben das Verhalten des Statorstromes. Der Statorstrom stellt in Frequenz und Amplitude eine konstante Größe dar. Wird ω_{KS} mit der Polteilung des Motors τ_p multipliziert, beschreibt $v_{RS} = \omega_{RS} \cdot \tau_p / \pi$ die translatorische Geschwindigkeit des Statorfeldes. Die Komponenten der Rotorflüsse ergeben sich nach Umstellung der Flußgleichung zu

$$\frac{d\psi_{Rd}}{dt} = u_{Rd} - \frac{R_R}{L_R} \cdot \psi_{Rd} + \frac{R_R}{L_R} \cdot L_h \cdot i_{Sd} + (\omega_{KS} - \omega_{RS}) \cdot \psi_{Rq} \quad (5)$$

$$\frac{d\psi_{Rq}}{dt} = u_{Rq} - \frac{R_R}{L_R} \cdot \psi_{Rq} - (\omega_{KS} - \omega_{RS}) \cdot \psi_{Rd} \quad \text{mit } i_{Sq} = 0 \quad (6)$$

Entscheidend für die überlagerte Geschwindigkeitsregelung ist die Kraftbildung. Die Schubkraft setzt sich nach (7) aus dem Produkt von Ständerstrom und q-Komponente des Rotorflusses zusammen, ist damit der Rotorflußkomponente ψ_{Rq} direkt proportional.

$$F = \frac{3\pi}{2\tau_p} \frac{L_h}{L_R} \cdot \text{Im}\{i_S \cdot \psi_R^*\} = -\frac{3\pi}{2\tau_p} \frac{L_h}{L_R} \cdot i_{Sd} \cdot \psi_{Rq} \quad (7)$$

Für die von den o.a. Gleichungen linear abhängigen Rotorströme erhält man

$$i_{Rd} = \frac{1}{L_R} \psi_{Rd} - \frac{L_h}{L_R} i_{Ss} \quad \text{und} \quad i_{Rq} = \frac{1}{L_R} \psi_{Rq} \quad \text{mit} \quad i_{Sq} = 0 \quad (8)$$

Der aus den Gleichungen (1) bis (8) erstellte Wirkungsplan ist in Bild 3 dargestellt:

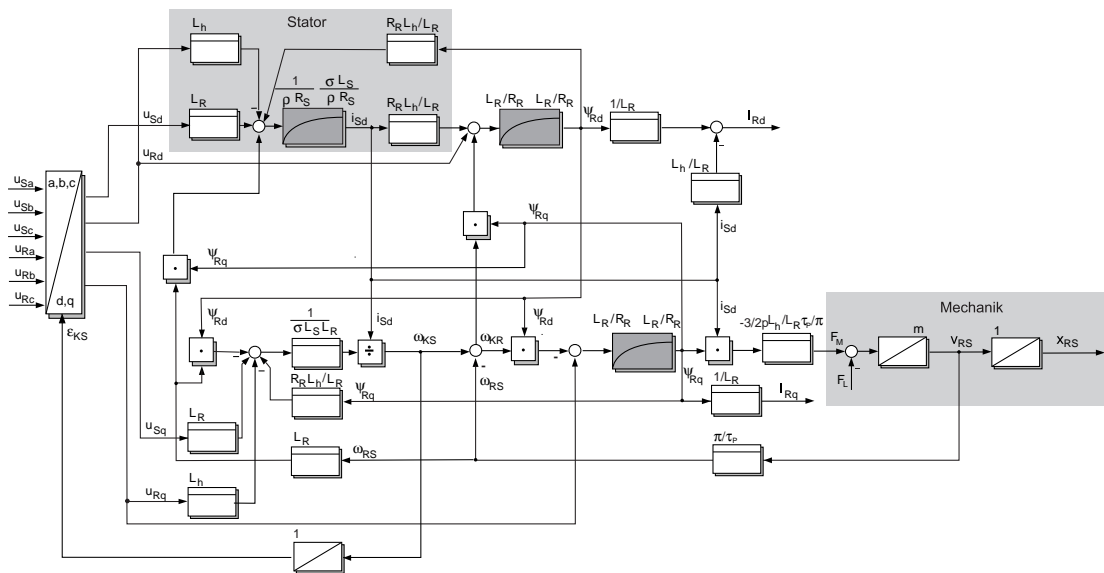


Bild 3: Modell des statorstromorientierten doppelgespeisten Linearmotors

Setzt man für den stationären Fall ψ_{Rq} in die Kraftgleichung ein, erhält man

$$F = -\frac{3\pi}{2\tau_p} \frac{L_h}{R_R} \cdot i_{Sd} \cdot [u_{Rq} - (\omega_{KS} - \omega_{RS}) \cdot \psi_{Rd}] = -\frac{3\pi}{2\tau_p} \frac{L_h}{R_R} \cdot i_{Sd} \cdot [u_{Rq} - s \cdot \psi_{Rd}] \cdot \omega_{KS} \quad (9)$$

Hier wird die Abhängigkeit der Kraftbildung einmal vom Schlupf s und von ψ_{Rd} deutlich. Über den Ständerfluß ψ_{Rd} wird Spannung in den Läuferwicklungen induziert. Wird ψ_{Rd} im Läufer zu null geregelt, so wird diese Wirkung aufgehoben. Liegt synchroner Betrieb vor ($s = 0$), so kann lediglich über die Läufer Spannung u_{Rq} Einfluß auf den Schub genommen werden. Der Motor verhält sich dann wie eine Synchronmaschine.

Bei konstanter Statorstromamplitude ist die Schubkraft proportional zur Läuferflußkomponente ψ_{Rq} . Stellgröße hierfür bildet die Läuferflusskomponente u_{Rq} . Daher ist der ψ_{Rq} -Regelkreis der Geschwindigkeitsregelung unterlagert und bildet die Schubkraftregelung (Bild 4).

Die Flußkomponente ψ_{Rd} und der nur begrenzt einstellbare Schlupf s beeinflussen die Schubkraftbildung nicht, haben aber Einfluß auf den Energiefluß im Luftspalt. Über u_{Rd} kann ψ_{Rd} so geregelt werden, daß die gewünschten energetischen Verhältnisse vorliegen. Wird das Konzept beispielsweise als Fahrzeugantrieb eingesetzt, so muß im Fahrzeug Energie zur LäuferSpeisung durch Bordbatterien bereitgestellt werden, deren Ladezustand die Sollwerte für die Energieregulierung beeinflusst.

Die Istgrößen der Flußkomponenten ψ_{Rd} und ψ_{Rq} werden in einem Flußmodell aus den gemessenen Stator- und Läuferströmen direkt ermittelt.

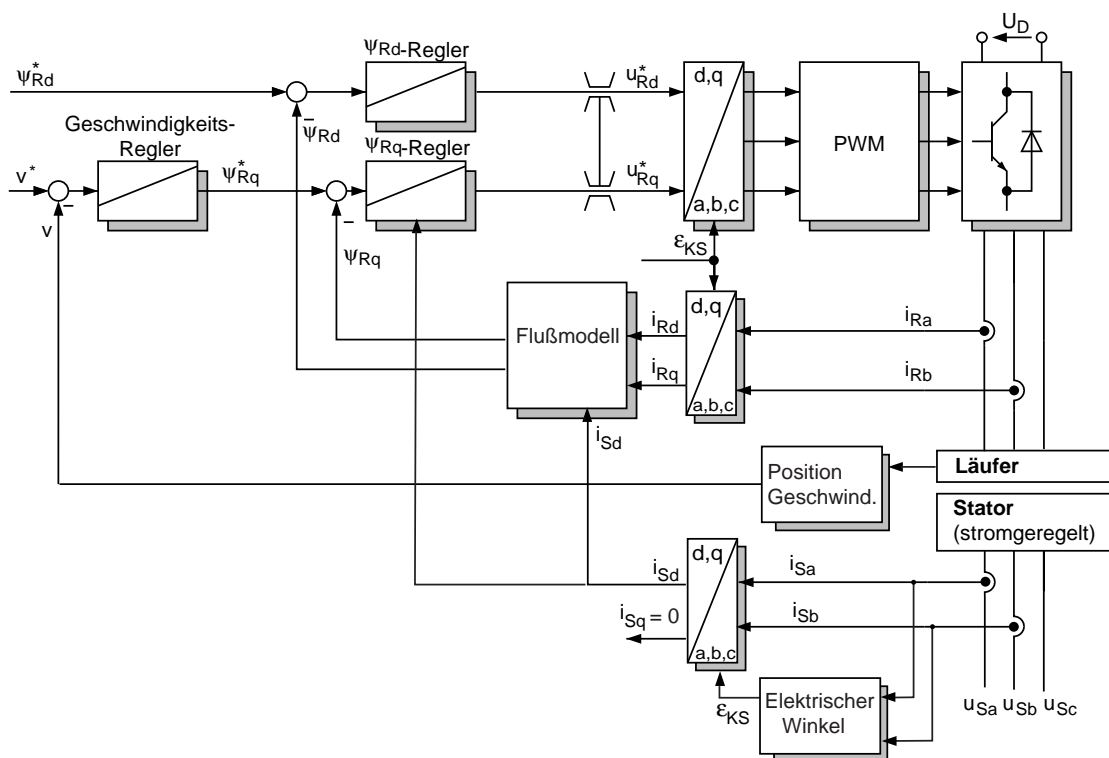


Bild 4: Statorstromorientierte Regelstruktur

Der Sollwert für ψ_{Rd} wird so vorgegeben, daß die Läuferverlustleistung minimal wird. Dann muß gelten [2]:

$$\psi_{Rd_soll} = I_{Sd_soll} \cdot L_h \quad (10)$$

5. Simulationsergebnis

Vorgegeben ist ein Sollwertsprung der mechanischen Geschwindigkeit von 4.75 m/s auf den Sollwert von 5 m/s. Die Statorstromamplitude wird konstant auf den Wert von 10 A geregelt, bei einer Statorwellengeschwindigkeit von 5.55 m/s. Der Statorstrom bleibt nahezu unbeeinflusst vom Regelvorgang (Bild 5).

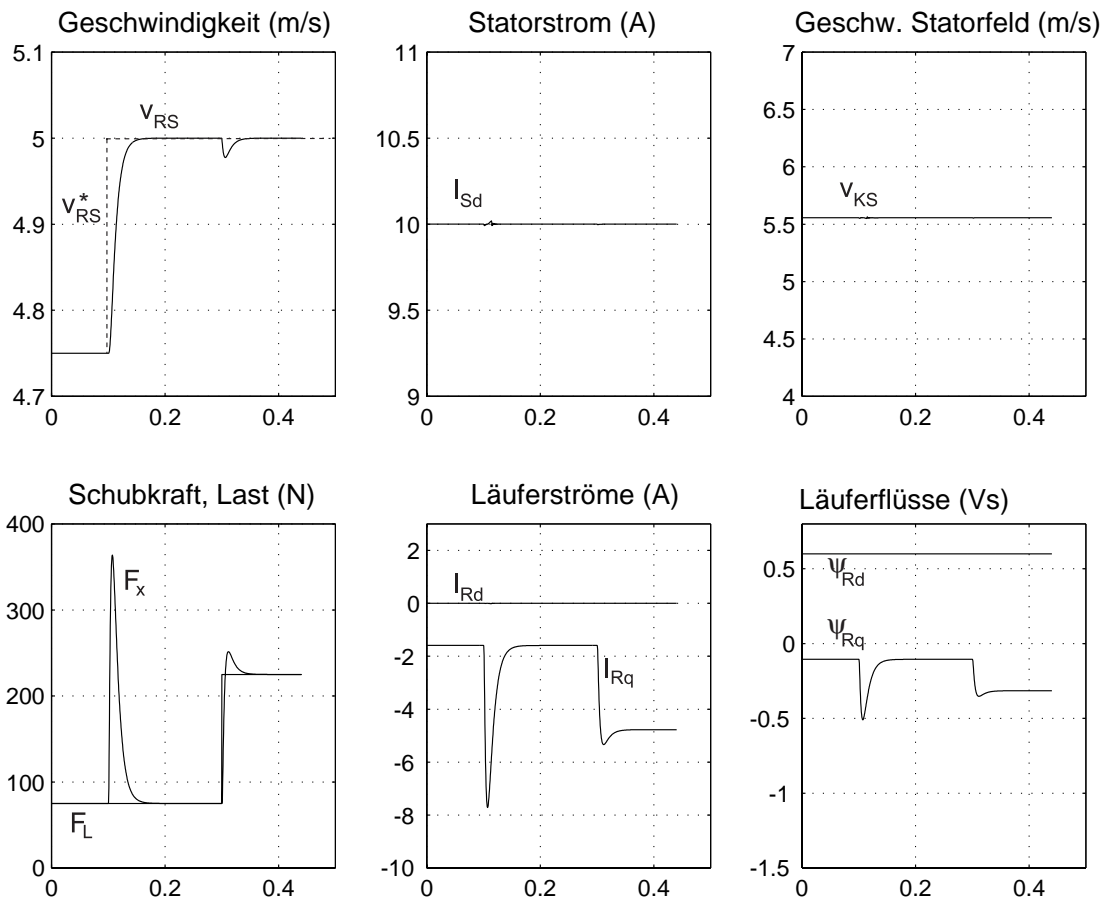


Bild 5: Simulationsergebnisse

Die Rotorflußkomponente ψ_{Rd} ist nach (10) auf den Wert 0,6 Vs geregelt, und über ψ_{Rq} wird das nötige Beschleunigungsmoment aufgebracht. Zum Zeitpunkt $t = 0,3s$ wirkt ein Lastkraftsprung von 100 N auf das Sekundärteil. Diese Störgröße wird ebenfalls über den Läuferfluß ψ_{Rq} ausgegelt.

Aufgrund der begrenzten Läuferstromstärke besitzt der Läuferfluß ψ_{Rq} einen oberen Grenzwert, der beim Großsignalverhalten erreicht wird.

6. Stationäre Betrachtung

Der stationäre Fall soll hier betrachtet werden, wenn ein nahezu konstanter Schub und eine konstante Läufergeschwindigkeit gefordert werden. Dann kann im Läufer der Rotorfluß ψ_{Rd} variiert werden, so daß der Leistungsfluß zwischen Stator und Läufer beeinflussbar ist, der Kraftbedarf aber unberührt bleibt und weiterhin über ψ_{Rq} eingestellt wird. Bild 6 zeigt die Kennfelder des Motors, wobei hier als Parameter der Schlupf und der Rotorfluß ψ_{Rd} eingehen.

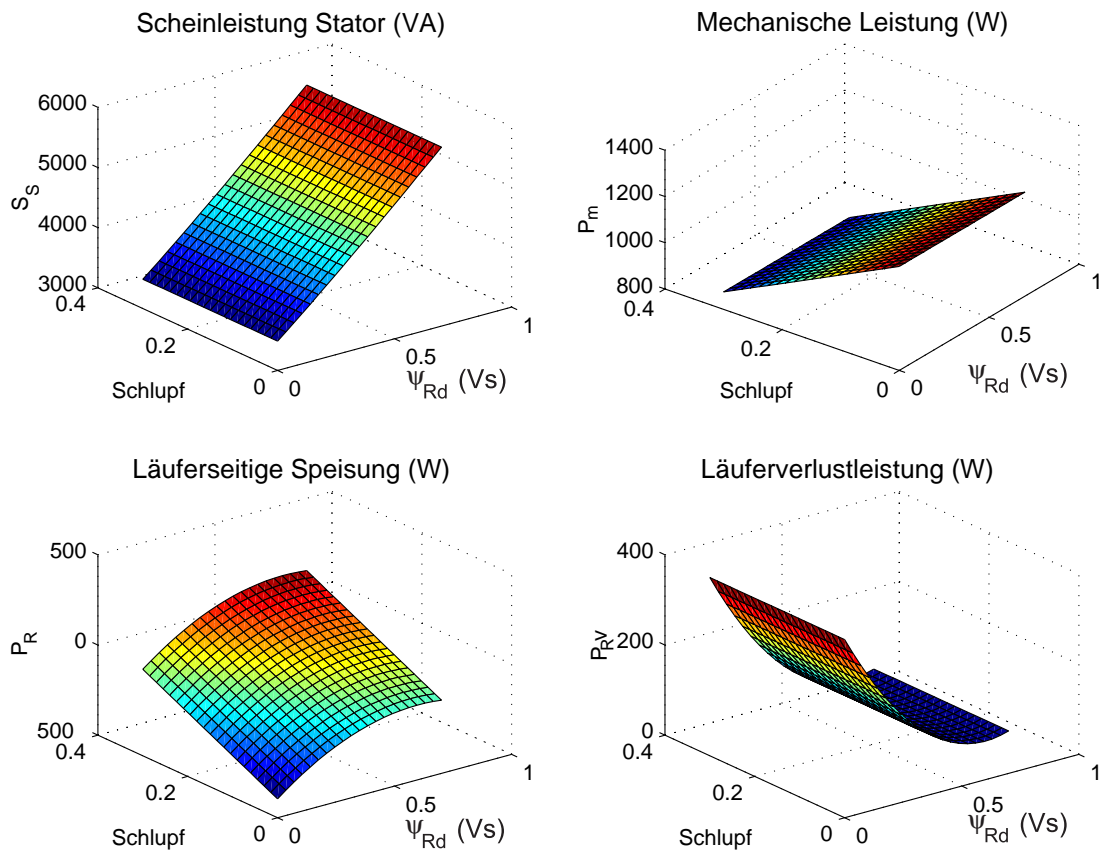


Bild 6: Leistungskennfelder von Stator und Läufer bei konstanter Lastkraft

Linearmotoren weisen im Gegensatz zu rotierenden Maschinen eine wesentlich höhere Streuinduktivität auf, die zu einer stark erhöhten Blindleistungsaufnahme führt. Sollen auf einem Fahrzeug Energiespeicher geladen werden, so ist mit ω_{KS} eine Erhöhung des Schlupfes möglich, die zu Rückspeisung von Energie in den Läufer führt.

Im Extremfall der Läuferbewegung bei stillstehendem Statorfeld wirkt der Läufer als „Kurzstator“, er muß hierbei die gesamte, für die Translation nötige Energie aufbringen.

Die Läuferverlustleistung wird genau dann minimal, wenn Gleichung (10) erfüllt ist. Die Erweiterung des Modells auf zwei Läufer ist problemlos möglich. Hierzu sind die Rotorgrößen in der Statorstromgleichung (1) um den zweiten Läufer zu erweitern.

7. Zusammenfassung

Die Modellierung des doppeltgespeisten Asynchron-Linearmotors hat gezeigt, daß die Regelung im statorstromfesten Koordinatensystem zu geeigneten Ergebnissen führt. Die separate Regelung von Energiefluß und Schubkraft im Läufer ist über die Rotorflußkomponenten gegeben. Voraussetzung hierfür ist eine nicht allzu große Streuinduktivität des Langstators, da der Spannungsbedarf des Motors sonst die Spannungsgrenze des PWR erreicht. Gegenstand weiterer Untersuchungen ist die Verifikation der Ergebnisse am Prüfstand.

8. Literatur

- [1] Lückel, Grotstollen, Jäker, Henke, Liu: „*Mechatronic Design of a Modular Railway Carriage*“, AIM'99, Atlanta
- [2] J. Kiel: „*Modellbildung und Simulation eines geregelten, doppeltgespeisten Asynchron-Linearmotors*“, Diplomarbeit am FG Leistungselektronik und el. Antriebstechnik, Universität Paderborn
- [3] T. Sakamoto, S. Tsunehiro: „*Propulsion Control of Superconducting Linear Synchronous Motor Vehicle*“, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.33 No. 5, S. 3460-3462
- [4] P. Albrecht: „*Die geregelte doppeltgespeiste Asynchronmaschine als drehzahlvariabler Generator am Netz*“, Diss. Universität Braunschweig 1984
- [5] U. Henning, P. G. Kamp, J. Hochleitner: „*Langstator-Synchronmotorantrieb des TRANSRAPID*“, Elektrische Bahnen 93 (1995), S.230 – 235