

Linearantriebstechnik mit inhärenter kontaktloser Energieübertragung

A. Peters, C. Romaus, C. Henke, J. Böcker
 Universität Paderborn, Warburger Str. 100
 33098 Paderborn

Kurzfassung- Das Potential zur Energieübertragung vom Stator zum Läufer eines doppelt gespeisten Asynchron-Lineararmotors, der als Antrieb eines autonomen Schienenfahrzeuges dient, ist für unterschiedliche Betriebsarten erforscht worden. Die Regelung der Kraft und Energieübertragung bei Relativbewegungen mehrerer Fahrzeuge auf einem Statorabschnitt (Konvoi), sowie die Synchronisation der Felder von Fahrzeugen und Strecke wird behandelt. Ein intelligentes Energiemanagement, basierend auf Methoden der Mehrzieloptimierung, in Verbindung mit einem hybriden Energiespeicher wird vorgestellt.

I. EINFÜHRUNG, SYSTEMÜBERBLICK RAILCAB

Im Rahmen der Forschungsinitiative "Neue Bahntechnik Paderborn" wird an der Universität Paderborn ein neuartiges Transportsystem entwickelt, welches Personen oder Güter ohne Umsteigen bzw. Umladen direkt ans Ziel transportiert. Dabei fahren autonome Fahrzeuge, die sogenannten RailCabs, ohne Fahrplan nach Bedarf. Eine fahrzeugseitig aktive Lenkung ermöglicht eine Konvombildung auf hoch frequentierten Strecken, was eine Reduzierung des Luftwiderstandes und damit eine Energieeinsparung und eine Erhöhung der Transportkapazität mit sich bringt.

Angetrieben wird das Fahrzeug durch einen *doppelt gespeisten Asynchron-Lineararmotor* (DGALM), welcher auch zum Bremsen eingesetzt wird. Die Doppelspeisung ermöglicht hierbei zum einen eine Relativbewegung von mehreren Fahrzeugen auf einem Statorabschnitt, was für den Konvoi Betrieb notwendig ist, zum anderen eine berührungslose Energieübertragung von der Strecke in das Fahrzeug. Um eine gleichbleibende Energieversorgung bei Lastschwankungen sicherzustellen, wird ein hybrides Energiespeichersystem eingesetzt. Beim hybriden Speicher decken *Doppelschichtkondensatoren* (DLC) Leistungsspitzen und Batterien den Grundlastbereich ab, wozu ein intelligentes Energiemanagement notwendig ist.

Im Jahr 2003 wurde an der Universität Paderborn eine Versuchsstrecke im Maßstab 1:2,5 errichtet, welche eine Gesamtlänge von 530 m und einen Abschnitt mit einer Steigung von 5,3% aufweist. Eine passive Weiche und 2 Versuchsfahrzeuge ermöglichen unter Anderem die Untersuchung von Strategien zur Bildung und Auflösung von Konvois. Alle Komponenten, die im späteren Serien-RailCab eingesetzt werden sollen, sind auf den beiden Versuchsfahrzeugen implementiert. Dazu gehören das Einzelachsfahrwerk mit Losradsatz und aktiver Lenkung, je zwei Federneigemodule und je zwei Läuferelemente des DGALM. [1]

II. KONTAKTLOSE ENERGIEÜBERTRAGUNG VON DER STRECKE INS FAHRZEUG

Beim RailCab wird über den DGALM neben der Antriebsfunktion auch Energie vom Stator in den Läufer übertragen. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten: die magnetische Wanderwelle (Abb. 1) oder die stehende magnetische Welle mit oszillierender Amplitude (Abb. 2).

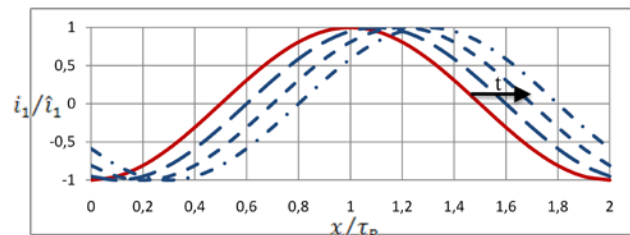
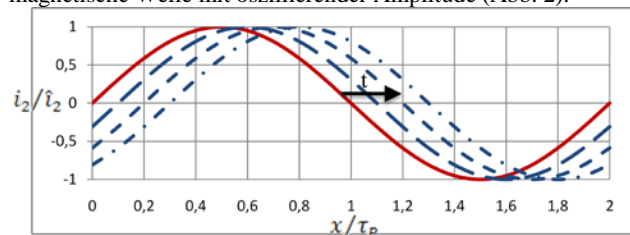


ABB. 1: WANDERWELLE: STATOR- (UNTEN) UND LÄUFERSATROM (OBEN) BEZOGEN AUF DIE POLTEILUNG

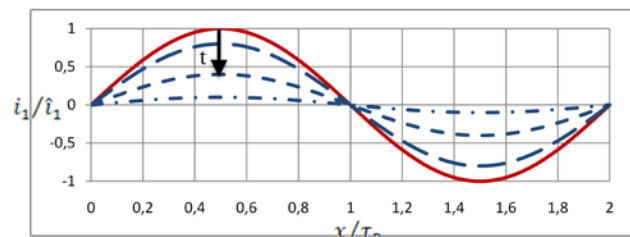
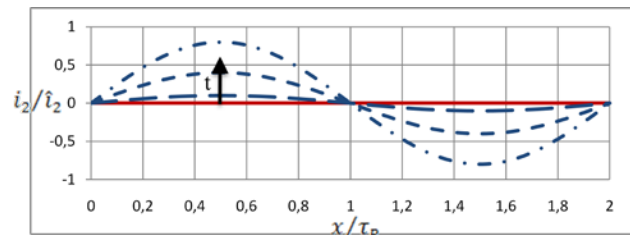


ABB. 2: STEHENDE WELLE: STATOR- (UNTEN) UND ROTORSTROM (OBEN) BEZOGEN AUF DIE POLTEILUNG

Um beide Übertragungsmöglichkeiten in einer mathematischen Gleichung darzustellen kann man die Leistungsbilanz des DGALM heranziehen (siehe Abb. 3).

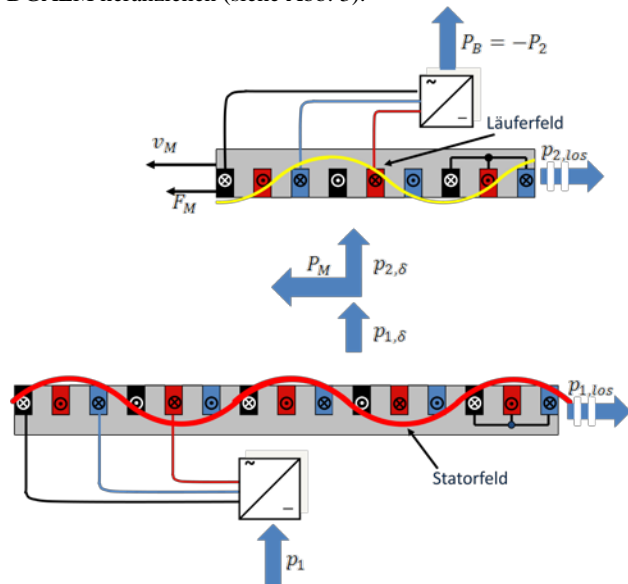


ABB. 3: LEISTUNGSFLUSS IM DOPPELT GESPEISTEN ASYNCHRON-LINEARMOTOR

$$\frac{dw_{mag}(t)}{dt} + p_M(t) = p_1(t) - p_{1,loss}(t) + p_2(t) - p_{2,loss}(t) \quad \text{GL. 1}$$

p_1 und p_2 sind die dem Stator- und dem Läufer zugeführten elektrischen Leistungen, p_M ist die mechanische Leistung und $p_{1,loss}$ und $p_{2,loss}$ sind die Verlustleistungen im Stator und Läufer, welche sich aus Eisen- und Kupferverlusten zusammensetzen. w_{mag} bezeichnet die gespeicherte magnetische Energie.

In komplexer Vektorschreibweise kann die Leistungsbilanz aus Gl. 1 folgendermaßen geschrieben werden:

$$\frac{dw_{mag}}{dt} + F_M v_M = \frac{3}{2} \text{Re} \left\{ \frac{d\psi_1}{dt} \underline{i}_1^* - \frac{d\psi_2}{dt} \underline{i}_2^* \right\} - \frac{3}{2} \text{Im} \left\{ \underline{\psi}_1 \underline{i}_1^* \right\} \frac{\pi}{2} v_M \quad \text{GL. 2}$$

Die Innere Leistung des Motors setzt sich aus der zeitlichen Änderung der magnetischen Energie w_{mag} und der mechanischen Leistung $F_M v_M$ zusammen. Durch Koeffizientenvergleich in Gl. 2 erhält man die zeitliche Änderung der magnetischen Energie:

$$\frac{dw_{mag}}{dt} = \frac{3}{2} \text{Re} \left\{ \frac{d\psi_1}{dt} \underline{i}_1^* - \frac{d\psi_2}{dt} \underline{i}_2^* \right\} \quad \text{GL. 3}$$

Man sieht, dass die rechte Seite von Gl. 3 die Summe der inneren Leistungen der Stator- und Läuferwicklungen darstellt, welche auch als Luftspaltleistung betrachtet werden kann:

$$p_{1\delta} = \frac{3}{2} \text{Re} \left\{ \frac{d\psi_1}{dt} \underline{i}_1^* \right\} \\ p_{2\delta} = -\frac{3}{2} \text{Re} \left\{ \frac{d\psi_2}{dt} \underline{i}_2^* \right\} \quad \text{GL. 4}$$

Die Freiheitsgrade für die Arbeitspunkteinstellung und Energieübertragung des DGLAM sind der Statorstrom und seine Frequenz (siehe III). Daher ist es von Vorteil, das System im Statorkoordinatensystem [2],[3] zu beschreiben (siehe Abb. 4). Dabei kann der Läuferstrom im Statorkoordinatensystem als $\underline{i}_2 = i_{2,d} + j i_{2,q}$ geschrieben werden.

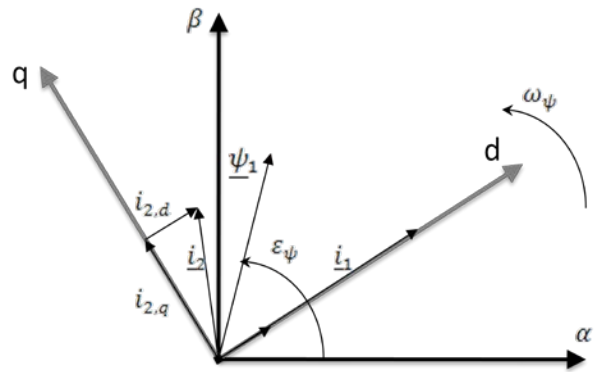


ABB. 4: STATORSTROMORIENTIERTES KOORDINATENSYSTEM (D,Q)

Nimmt man an, die Induktivitäten des Motors seien linear, kann der verkettete Fluss $\underline{\psi}_1$ (Abb. 4) als Funktion von Stator- und Läuferstrom dargestellt werden.

$$\underline{\psi}_1 = L_1 i_{1,d} + L_h \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad \text{GL. 5}$$

Die zeitliche Änderung des verketteten Flusses im statorfesten Koordinatensystem (α, β) ergibt

$$\frac{d\psi_1}{dt} = \frac{d\psi_1}{dt} e^{j\varepsilon_\psi} + j\omega_\psi \psi_1 e^{j\varepsilon_\psi} \quad \text{GL. 6}$$

Gl. 6 führt zu folgender Gleichung der momentanen Luftspaltleistung, die in zwei Terme gegliedert werden kann:

$$p_{1,\delta}(t) = \boxed{\frac{3}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{d\psi_1}{dt} e^{j\varepsilon\psi_{\underline{1}}^*} \right\}}_{\text{Term A}} + \boxed{\frac{3}{2} \operatorname{Re} \{ j\omega_\psi \psi_1 e^{j\varepsilon\psi_{\underline{1}}^*} \}}_{\text{Term B}}$$

GL. 7

Offensichtlich hängen beide Möglichkeiten der Energieübertragung vom Winkel zwischen dem verketteten Statorfluss und dem Statorstrom ab.

Betrachtet man den Term A (Gl. 7), so kann die Luftspaltleistung durch Verändern der sinusförmigen Amplitude des verketteten Flusses erzeugt werden, wobei der Statorstrom $i_{1,d}$ und der Läuferstrom i_2 (Gl. 8) die gleiche Orientierung haben, weshalb der Läuferstrom in die d-Achse gelegt wird. Die q-Komponente beider Ströme ist dann Null. Dann entsteht eine stehende magnetische Welle mit oszillierender Amplitude (Abb. 2) auf der d-Achse. Dies wird im Folgenden als Betriebsart A bezeichnet.

$$\psi_{1,d} = L_1 \hat{i}_{1,d} \cos(\omega_1 t) + L_h \frac{N_2}{N_1} \hat{i}_{2,d} \sin(\omega_1 t)$$

GL. 8

$$p_{1,\delta} = \frac{3}{2} \omega_1 L_h \frac{N_2}{N_1} \hat{i}_{1,d} \hat{i}_{2,d} \cos^2(\omega_1 t)$$

GL. 9

Die Luftspalt-Wirkleistung für die Betriebsart A kann festgelegt werden als

$$P_{1,\delta} = \frac{3}{4} \omega_1 L_h \frac{N_2}{N_1} \hat{i}_{1,d} \hat{i}_{2,d}$$

GL. 10

Analog zu Gl. 10 kann die Luftspalt-Wirkleistung des Sekundärteils festgelegt werden als

$$P_{2,\delta} = -\frac{3}{4} \omega_2 L_h \frac{N_2}{N_1} \hat{i}_{2,d} \hat{i}_{1,d}$$

GL. 11

Term B (Gl. 7) stellt eine Wanderwelle mit senkrechter Orientierung von Stator- und Läuferstrom dar. Hierbei sind die Längen der Stromzeiger konstant, wobei die Zeiger mit ω_ψ rotieren. Dies wird als Betriebsart B (Abb. 1) bezeichnet. Die Ströme in dieser Betriebsart werden als komplexe Effektivwertzeiger [4] betrachtet. Die Luftspalt-Wirkleistungen in dieser Betriebsart sind

$$P_{1,\delta} = \frac{3}{2} \omega_1 \frac{L_h N_2}{N_1} I_{1,d} I_{2,q}$$

GL. 12

$$P_{2,\delta} = -\frac{3}{2} \omega_2 \frac{L_h N_2}{N_1} I_{1,d} I_{2,q}$$

GL. 13

Mit der Annahme linearer Induktivitäten ist die tatsächliche Leistung von Betriebsart B doppelt so groß wie bei Betriebsart A bei gleicher Versorgungsfrequenz und Maximalstrom (vgl. Gl. 10 und Gl. 11).

Um die in das Bordnetz übertragene Leistung P_B abschätzen zu können müssen auch die Verluste betrachtet werden.

$$P_1 = P_{1,\delta} + P_{1,loss} \quad P_B = P_{2,\delta} - P_{2,loss}$$

GL. 14

$$P_M = v_M F_M = P_{2,\delta} - P_{1,\delta}$$

GL. 15

Wegen der Richtung des Statorstromes und des bewegten Läufers des DGALM benötigt man eine Beschreibung der Frequenz beider Teile des Motors bezogen auf die Fahrzeuggeschwindigkeit v_M , welche durch Gl. 16 gegeben ist.

$$v_M \frac{\pi}{\tau_P} + \omega_2 = \omega_1$$

GL. 16

$$F_M = K_M I_{1,d} I_{2,q}$$

GL. 17

Die Schubkraft F_M hängt von der d-Komponente des Stator-Effektivstromes und der q-Komponente des Läufer-Effektivstromes ab. Die Motorkonstante K_M hängt stark vom Luftspalt ab. Aus Gl. 17 ist ersichtlich, dass Term A keinen Einfluss auf die Schubkraft hat, da die q-Komponente des Läuferstromes $i_{2,q}$ zu Null geregelt wird (vgl. Gl. 10 und Gl. 11).

Die Betriebsarten A und B unterscheiden sich in zwei Dingen. Werden die Ströme wie in Betriebsart B geregelt, ist eine Schubkraft erzeugung möglich. Zusätzlich ermöglicht diese Betriebsart die größtmögliche Leistungsübertragung, welche durch den Maximalstrom und die Maximalfrequenz begrenzt ist. Betriebsart A ist im Stillstand sinnvoll, wenn keine Schubkraft benötigt wird, obwohl die maximale Leistungsübertragung eingeschränkt wird. Die Verluste in Gl. 14 wurden hier nicht detailliert betrachtet. Es ist allerdings bekannt, dass die Verluste bei Erhöhung von Strom und Frequenz ansteigen. Um also die maximale übertragene Leistung P_B bezogen auf die zugeführte Leistung P_1 zu beschreiben, müssen die Verluste aus Abb. 3 mit einbezogen werden [5].

Da im Falle eines Bahnfahrzeuges eine Außenanwendung gegeben ist, ist zusätzlich der Einfluss des Wetters ausschlaggebend, da sich die mechanischen Ausmaße von etwa Stator, Läufer oder der Räder verändern können. Daher ist, neben den Eisen- und Kupferverlusten, auch der veränderliche Luftspalt zu betrachten, um den Wirkungsgrad des Motors über den gesamten Betriebsbereich präzise vorhersagen zu können.

III. RELATIVBEWEGUNG MEHRERER FAHRZEUGE AUF GLEICHEM STATOR-ABSCHNITT (KONVOI-BETRIEB)

Die Schubkraft, welche die Bewegung des Fahrzeuges bestimmt sowie die Energieübertragung vom Stator zum Läufer des DGALM werden durch Regelung des Statorstrom- und Läuferstrom-Vektors eingestellt. Um Konvois bilden zu können, muss eine Relativbewegung mehrerer Fahrzeuge auf einem gemeinsamen Stator-Abschnitt möglich sein, was die Regelung von Schubkraft und Energieübertragung komplexer macht, da verschiedenen Anforderungen an Schubkraft und Energieübertragung von verschiedenen Fahrzeugen auf einem gemeinsamen Statorabschnitt bedient werden müssen. Zudem müssen die Läuferfelder der Fahrzeuge mit dem Statorfeld synchronisiert werden. Die Anforderungen dafür werden zum Einen durch Strategien zur Bildung von Konvois [6] bestimmt, welche vor allem die Bewegungsregelung beeinflussen. Zum Anderen wird versucht, durch ein intelligentes Energiemanagement den Spagat zwischen niedrigen Verlusten und maximaler Energieübertragung zu schaffen, was unter anderem durch einen hybriden Energiespeicher an Bord der Fahrzeuge unterstützt wird (Siehe IV).

i. REGELUNG DER SCHUBKRAFT

Gl. 18 stellt noch einmal die Abhängigkeit der momentanen Schubkraft F_M von den Stromvektoren \underline{i}_1 und \underline{i}_2 von Stator und Rotor dar.

$$F_M = \frac{3\pi}{2\tau_p} L_h \text{Im}\{\underline{i}_1 \underline{i}_2^*\} = \frac{3\pi}{2\tau_p} L_h i_1 i_2 \sin\alpha_{1-2}$$

GL. 18

α_{1-2} beschreibt die Phasenverschiebung zwischen beiden Vektoren. Wie in [7] dargestellt, beschreibt α_{1-2} auch die räumliche Verschiebung der Wanderwellen, die vom Stator und Läufer erzeugt werden (siehe Abb. 5).

Wie in Abb. 5 zu sehen ist, stellen α_1, α_2 und α_{1-2} die Positionen und Verschiebung der Wanderwellen im statorfesten Koordinatensystem dar. Im läuferfesten Koordinatensystem stellen β_1, β_2 die Positionen der Wanderwellen dar. Diese unterscheiden sich von α_1, α_2 in der Winkellage α_M des Fahrzeuges, was in Längsrichtung x_M entspricht. $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ sind die Phasenwinkel der Stromvektoren im jeweiligen Bezugskordinatensystem. Diese Winkel $\alpha_1 = \varepsilon_1, \beta_2 = \varepsilon_2$ bestimmen die Position der Wanderwelle.

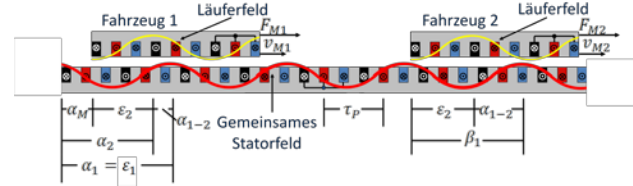


ABB. 5: PRINZIP DES DOPPELT GESPEISTEN ASYNCHRON-LINEARMOTORS MIT ZWEI FAHRZEUGEN AUF SEM SELBEN STATORABSCHNITT, ZEICHENERKLÄRUNG

Abhängig vom jeweiligen Koordinatensystem erhält man zwei Beschreibungen der Wellenverschiebung aus Abb. 5, welche zur Bestimmung des Winkels durch Regelung des Stromvektors verwendet werden können.

$$\alpha_{1-2} = \alpha_1 - \alpha_2 = \varepsilon_1 - \left(\varepsilon_2 + \frac{\pi}{\tau_p} x_M\right)$$

$$\alpha_{1-2} = \beta_1 - \beta_2 = \beta_1 - \varepsilon_2$$

GL. 19

Da minimale Ströme und Verluste erreicht werden, wenn die Bezugsgröße der Verschiebung der Wanderwellen ein ungerades vielfaches von $\pi/2$ ist, wird diese zu $\alpha_{1-2ref} = \pm \pi/2$ gesetzt. Zur Regelung der Stromvektoren wird das d/q -Koordinatensystem betrachtet, welches sich auf den Statorstrom bezieht. Diese Wahl scheint angemessen, weil die Läuferwicklungen aller Fahrzeuge, die sich auf einem Statorabschnitt befinden, von dessen Wanderwelle beeinflusst werden. Dementsprechend ist die q -Komponente des Statorstromes, im Gegensatz zum Läuferstrom, als Null anzusehen.

$$\underline{i}_1 = i_{1,d} + j0, \quad \underline{i}_2 = i_{2,d} + j i_{2,q}$$

GL. 20

In Anlehnung an die drei Stromkomponenten $i_{1,d} = i_1, i_{2,d}, i_{2,q}$ gibt es drei Freiheitsgrade für die Regelung: Das Produkt $i_1 i_{2,q}$ wird durch die geforderte Schubkraft bestimmt, der Quotient $i_1/i_{2,q}$ kann Optimierungszwecken dienen und der Strom $i_{2,d}$ wird zu Null gesetzt, was $\alpha_{1-2} = \pm \pi/2$ entspricht.

Auf diesen Grundlagen basierend wird die Schubkraftregelung im Fahrzeug durch Bildung der Beziehung zwischen dem Statorstrom- und dem Läuferstrom-Vektor in zwei Stufen erreicht:

Als erstes wird die Amplitude des Soll-Statorstromes $i_{1,ref}$ unter Berücksichtigung der Spannungs- und Strombegrenzung geprüft. Falls dies nicht kritisch ist können Verluste minimiert [7] oder andere Optimierungszwecke erfüllt werden. Alle 20 ms wird der Sollstrom $i_{1,ref}$ zusammen mit anderen Sollwerten ($i_{1,ref}, \varepsilon_{10}, ii$) an die streckenseitigen Umrichter übertragen [8]. Es müssen die Anforderungen aller Fahrzeuge betrachtet werden, falls mehrere Fahrzeuge auf einem Stator fahren. In diesem Fall wird ein Fahrzeug als Master deklariert, welches dann alle Entscheidungen trifft.

Als zweites wird die Regelung des Läuferstrom-Vektors mit einer hohen Dynamik auf jedem Fahrzeug unter Berücksichtigung der eigenen, spezifischen Anforderungen ausgeführt. Besonders die Sollgröße $i_{2,q}$ muss in Übereinstimmung mit der Schubkraft, die für die eigene Bewegungsregelung benötigt wird, ermittelt werden. Die Ausrichtung des Läuferstrom-Vektors, der senkrecht zum Statorstrom steht, ($i_{2,d} = 0$) wird durch genaue Regelung des Phasenwinkels ε_2 erreicht. Entsprechend Gl. 19 gibt es zwei Möglichkeiten zur Bestimmung dieses Winkels [9]. Ein Anteil der Ausrichtung des Läuferstrom-Vektors zum Statorstrom ist die automatische Erfüllung der Frequenzvorgabe

$$f_1 = f_2 + \frac{1}{2\tau_p} v_M$$

GL. 21

welche durch Differentiation von Gl. 19 entsteht. Die Erfüllung dieser Bedingung ist für Drei-Phasen-Maschinen notwendig, weil sonst die Wanderwellen von Stator und Läufer nicht synchronisiert werden und somit die Verschiebung α_{1-2} aus Gl. 18 und somit auch die Schubkraft F_t schwingen würden.

ii. REGELUNG DER ENERGIEÜBERTRAGUNG

Wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit nicht mit der Geschwindigkeit der Wanderwellen übereinstimmt ($v_M \neq 2\tau_p f_1$), wird beim Asynchronmotor Energie zwischen Stator und Läufer übertragen (siehe II). Für die vom Stator zum Läufer übertragene Leistung P_B gilt folgende Gleichung [7]:

$$P_B = -P_2 = -3\pi f_2 L_h i_1 i_{2q} = 2\tau_p f_2 F_M$$

GL. 22

Zur Regelung der Energieübertragung wird der Sollwert der Läuferfrequenz f_{2ref} nach dem Leistungsbedarf unter Verwendung von Gl. 22 und unter Berücksichtigung von Verlusten der Läuferwicklung [7] berechnet. Der Sollwert der Statorfrequenz f_{1ref} wird aus Gl. 21 errechnet und an die streckenseitigen Umrichter zusammen mit i_{1ref} übertragen.

iii. SYNCHRONISATION DES PRIMÄREN UND SEKUNDÄREN FELDES

Die Synchronisation der Wanderwellen, also die senkrechte Ausrichtung des Läuferfeldes auf das Statorfeld, ist eine wichtige Aufgabe, die sehr sorgfältig durchgeführt werden muss, da, falls der Fehler $\Delta\alpha_{1-2} = \alpha_{1-2} - \pi/2$ wächst, folgendes eintritt:

- Solange $|\Delta\alpha_{1-2}| < \pi/2$ ist, sinkt die in Gl. 18 berechnete Kraft. Dem zufolge müssen die Ströme, welche benötigt werden, um die gewünschte Kraft zu erzeugen, erhöht werden, was höhere Verluste mit sich führt. Beispielhaft wird die Kraft im Falle von $|\Delta\alpha_{1-2}| = \pi/4$ oder $|\Delta x_{1-2}| = \tau_p/4$ ($\tau_p = 100$ mm) auf 70,7 % gesenkt. Um dies zu kompensieren muss

der Sekundärstrom um 40 % erhöht werden, was eine Verdoppelung der Sekundärverluste mit sich bringt.

- Wenn $|\Delta\alpha_{1-2}| = \pi/2$ erreicht wird, was einem Fehler von 50 mm entspricht, wird überhaupt keine Kraft erzeugt.
- Für $|\Delta\alpha_{1-2}| > \pi/2$ ändert die Kraft ihr Vorzeichen, was eine Bewegung des Fahrzeuges in entgegengesetzte Richtung bedeutet und somit eine Instabilität der Regelung mit sich führt, da die Rückführung der Reglerschleife von negativ auf positiv gewechselt hat.

Demzufolge wird $|\Delta\alpha_{1-2}| \ll \pi/2$ angestrebt und $|\Delta\alpha_{1-2}| < \pi/2$ muss erfüllt werden, um die Funktion der Regelung zu gewährleisten.

Da die Wanderwelle des Stators von mehreren Fahrzeugen gemeinsam genutzt werden kann, muss die Verschiebung α_{1-2} auf jedem der Fahrzeuge durch entsprechende Regelung des Phasenwinkels des Läuferstrom-Vektors ε_2 geregelt werden (siehe Abb. 5). Laut Gl. 19 gibt es 2 Möglichkeiten der Bestimmung von ε_{2ref} . Im ersten Fall wird die Position der Wanderwelle des Stators über die Phase des Primärstromes und der Fahrzeugposition bestimmt. Im zweiten Fall wird sie direkt am Fahrzeug gemessen [9].

IV. HYBRIDER ENERGIESPEICHER ZUR PUFFERUNG DER BORDNETZSPANNUNG

Der doppelt gespeiste Asynchronlinearmotor ermöglicht, wie in Kapitel II beschrieben, die berührungslose Energieübertragung von der Strecke ins Bordnetz des RailCabs. Die übertragene Leistung hängt jedoch maßgeblich von den Betriebsbedingungen ab und ist somit zeitweise nicht in ausreichendem Maße möglich. Um eine kontinuierliche und zuverlässige Energieversorgung der Verbraucher im Bordnetz zu gewährleisten, wird ein Energiespeicher auf dem Fahrzeug benötigt.

Betrachtet man den fahrzeugseitigen Leistungsbedarf des RailCabs, erkennt man hohe kurzzeitige Leistungsspitzen und einen sehr geringen durchschnittlichen Leistungsbedarf bei einem hohen Energiebedarf (Abb. 6).

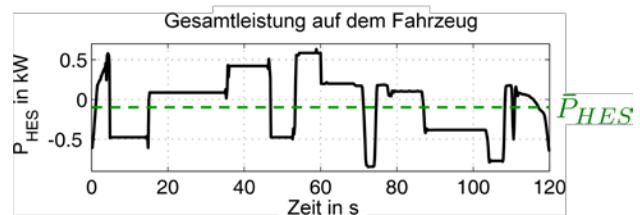


ABB. 6: FAHRZEUGSEITIGER LEISTUNGSBEDARF DES RAILCABS

Daraus resultieren auch die Anforderungen an den Energiespeicher, welche durch eine hohe Leistungsdichte, um Leistungsspitzen abzudecken, eine hohe Energiedichte, um den Grundenergiebedarf abzudecken, eine hohe Lebenserwartung, geringen Wartungsaufwand und ein niedriges Gewicht

beschrieben werden können. Langzeitspeicher wie *NiMH- oder Li-Ionen-Batterien* zeichnen sich durch eine hohe Energiedichte aus, Kurzzeitspeicher wie *Doppelschichtkondensatoren (DLC)* hingegen durch eine hohe Leistungsdichte. Allerdings erfüllen beide Speichertechnologien jeweils nur eine der Anforderungen. Eine Kombination aus Batterien und DLCs hingegen scheint geeignet, um allen Anforderungen gerecht zu werden. Abb. 7 zeigt die Struktur eines solchen hybriden Energiespeichersystems.

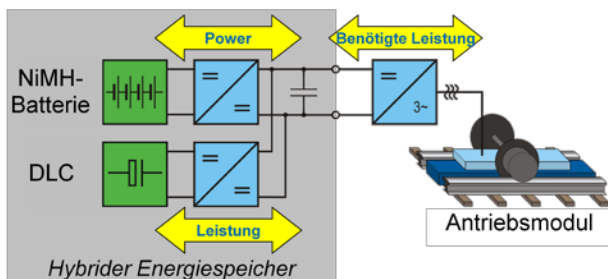


ABB. 7: HYBRIDER ENERGIESPEICHER

Die Energiespeicher sind jeweils über bi-direktionale DC-DC-Steller mit dem Bordnetz verbunden, um die relativ niedrige Spannung der Energiespeicher von ca. ~330 V von der hohen Bordnetzspannung von 690 V zu entkoppeln und die Leistungsflüsse aktiv regeln zu können. Durch die parallele Struktur des hybriden Energiespeichersystems entsteht ein Freiheitsgrad für die Aufteilung der Bordnetzleistung auf die Speicher, der durch ein Energiemanagement effektiv genutzt werden kann.

V. INTELLIGENTE FAHRZEUGMANAGEMENT

Für das betrachtete autonome Schienenfahrzeug muss für die Bewegung eine genau definierte Schubkraft aufgebracht werden. Diese Schubkraft ist also als Hauptanforderung anzusehen. Darüber hinaus gibt es noch zwei weitere gegenläufige Anforderungen: zum einen eine maximale Energieübertragung, welche durch Erhöhung der Ströme oder der Frequenz erreicht werden kann (siehe II), zum anderen ist es erstrebenswert die Verluste zu minimieren und somit den Wirkungsgrad zu erhöhen, was geringe Ströme und Frequenzen erfordert.

Die Motortemperatur und der Ladegrad des Speichers stellen hierbei weitere Einflüsse bei der Wahl der Betriebsstrategie dar. Weiterhin ist die Aufteilung der Bordnetzleistung auf den hybriden Energiespeicher zu optimieren. Gegenläufige Ziele hierbei sind die effiziente Speicherung der Energie, die zuverlässige Bereitstellung von Spitzenleistung, um die Verfügbarkeit zu erhöhen und die Lebensdauer der Energiespeicher.

Diese Zielkonflikte in der Kombination des Antriebs mit dem hybriden Energiespeicher sind klassische Beispiele für eine *Mehrzieloptimierungsaufgabe (MZO)*.

Bei der Optimierung ist es wünschenswert, dass das Fahrzeugmanagement selbsttätig auf veränderliche Einflüsse aus dem Umfeld des Fahrzeugs reagiert und sich entsprechend anpasst.

Dabei sind, je nach Situation, unterschiedliche Ziele relevanter als andere und sollten priorisiert werden.

Zum Entwurf der Betriebsstrategien für das Fahrzeugmanagement unter Berücksichtigung der Umfeldbedingungen werden daher Methoden und Optimierungsverfahren aus dem Sonderforschungsbereich 614 – „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ angewendet [10][11]. Dieser beschäftigt sich mit der Entwicklung selbstoptimierender Methoden und Konzepte, um mechatronische Systeme mit einer inhärenten Teilintelligenz auszustatten. Diese ermöglicht die situationsgerechte, selbstständige und flexible Festlegung bzw. Anpassung der Systemziele an veränderliche Betriebsbedingungen.

Im Selbstoptimierungsprozess werden aktuelle Daten des Fahrzeugs sowie des Energiespeichersystems wie Temperaturen, Ladegrade oder aktuelle Energiekosten erfasst. Weiterhin wird der zukünftige Leistungsbedarf des Fahrzeugbordnetzes prognostiziert [12][13]. Mithilfe dieser Situationsanalyse wird die Ausprägung der Systemziele bedarfsgerecht festgelegt und eine Betriebsstrategie für die nahe Zukunft mithilfe kontinuierlicher oder diskreter Mehrzieloptimierungsverfahren berechnet.

i. INTELLIGENTES BETRIEBSSTRATEGIE FÜR DEN HYBRIDEN ENERGIESPEICHER

Abhängig vom zu befahrenden Streckenabschnitt sind unterschiedliche Mehrzieloptimierungsverfahren zur Bestimmung einer Betriebsstrategie einsetzbar. Auf gut bekannten, immer wiederkehrenden Strecken mit festgelegten Leistungsprofilen, wie sie vor allem im S-Bahn- oder Shuttleverkehr vorkommen, können die rechenzeitaufwändigen *kontinuierlichen Mehrzieloptimierungsverfahren* eingesetzt werden. Für charakteristische Leistungsprofile werden offline Betriebsstrategien berechnet, die in einer Datenbank abgelegt und bei Befahren eines bekannten Streckenabschnitts abgerufen werden.

Die Optimierung der Betriebsstrategie erfolgt über mengenorientierte Algorithmen des Softwarepakets GAIO [14], mit denen eine numerische Abschätzung der Menge der optimalen Kompromisse, die sogenannte Paretomenge, berechnet wird. Diese Paretomenge wird aus diversen Paretopunkten gebildet, die jeweils eine Betriebsstrategie in Form eines Sollwertprofils für den Batteriestrom repräsentieren. Zur Laufzeit wird vor Befahren eines Streckenabschnitts eine zum gewählten Leistungsprofil gehörige Paretomenge aus der Datenbank abgerufen und ein geeigneter Paretopunkt entsprechend der nach der Situationsanalyse festgelegten Zielgewichtung ausgewählt. Dieser repräsentiert die entsprechend optimierte Betriebsstrategie für das hybride Energiespeichersystem.

Für seltener wiederkehrende Strecken bzw. bei nicht gespeicherten Leistungsprofilen wird ein deutlich schneller zu berechnendes Optimierungsverfahren benötigt. Hier kann eine diskrete Optimierung, die *Intelligente Vorausschau* in Form eines Suchbaums, eingesetzt werden.

Aufgrund der Beschränkung auf eine geringe Zahl diskreter Optimierungsvariablen wird eine echtzeitfähige Berechnung ermöglicht, jedoch verschlechtert sich die Ergebnisqualität je nach vorgegebenem Leistungsprofil mehr oder weniger deutlich. Nachteilig ist weiterhin, dass die Gewichtung der Zielfunktionen schon vor der Optimierung festgelegt werden muss, ohne eine Übersicht über den möglichen Wertebereich der Zielfunktionen zu bekommen, wie dies bei der Paretomenge möglich ist.

Abb. 8 zeigt die Verluste und den Ladegrad des Kurzzeitspeichers sowie die erreichten Zielfunktionen f_1 (Verluste) und f_2 (Leistungsreserve/Verfügbarkeit) für eine doppelte Überfahrt des gleichen Streckenabschnitts. Während der ersten Überfahrt wird das Ziel „Leistungsreserve maximieren“ priorisiert, was einen sehr ausgeglichenen Ladegrad des Kurzzeitspeichers SOC_{DLC} , aber auch höhere Verluste bedingt. Die zugehörige Zielfunktion f_2 wird minimal. Während der zweiten Überfahrt wird nun das Ziel „Verluste minimieren“ priorisiert. Hier sind nun die Verluste geringer, Zielfunktion f_1 wird minimiert, während der Ladegradbereich des DLC deutlich ausgenutzt wird. Im Gegensatz zu einer Betriebsstrategie mit statischer Zielfestlegung – in grün dargestellt – ermöglicht die selbstoptimierende Strategie somit eine situationsangepasste Zielauswahl [10].

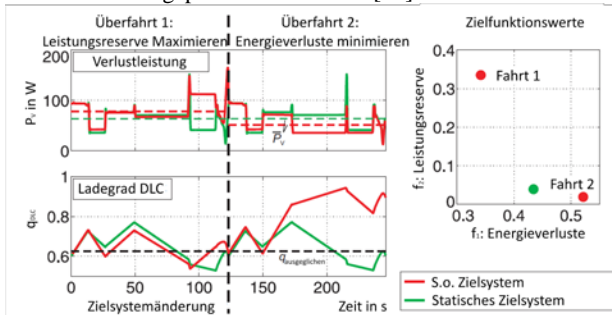


ABB. 8: VERGLEICH EINER SELBSTOPTIMIERENDEN BETRIEBSSTRATEGIE MIT VERÄNDERLICHEM ZIELSYSTEM MIT EINER BETRIEBSSTRATEGIE MIT STATISCHEM ZIELSYSTEM

ii. ARBEITSPUNKTZWUWEISUNG DES ANTRIEBES

Bei der Arbeitspunktzuweisung des Linearmotors treten eine konvexe Funktion von Zielsetzungen f_1 (gesamte Verluste) und eine konkave Funktion von Zielsetzungen f_2 (übertragene Leistung) hervor. Die Optimierungsvariablen sind Strom und Frequenz. Die Zeit t tritt als zusätzlicher Parameter auf. Diese MZO-Aufgabe kann dargestellt werden als:

$$\min \left\{ F(x, t) = \begin{pmatrix} f_1(x, t) \\ f_2(x, t) \end{pmatrix} : x \in \mathbb{R}^2 \right\}$$

GL. 23

Da es nicht effizient wäre, die gesamte Paretomenge für jeden Punkt von t zu berechnen, wird eine Paretomenge für einen festen Wert von t mit der Software GAIO berechnet.

In Unserem Fall hängt die Wahl eines Pareto Optimums der mit GAIO errechneten Paretomenge von zwei Betriebsgrößen ab: dem Ladegrad des Speichers q und der Motortemperatur θ . Ein niedriger Ladegrad bedingt eine Erhöhung der übertragenen Leistung. Sie bringt erhöhte Verluste und damit einen Anstieg der Motortemperatur mit sich. Um den Motor vor dem Risiko eines Schadens zu schützen, muss die Motortemperatur mit einbezogen werden.

Mit diesen Methoden der MZO kann in unserem Fall ein elektrisches Profil aus einem gegebenen mechanischen Profil für ein Zeitfenster von 6 Sekunden in näherungsweise 1,5 Sekunden berechnet werden.

Abb. 9 zeigt die Zielfunktionen für ein elektrisches Profil bestehend aus einer Beschleunigungsphase gefolgt von einer Abbremsphase.

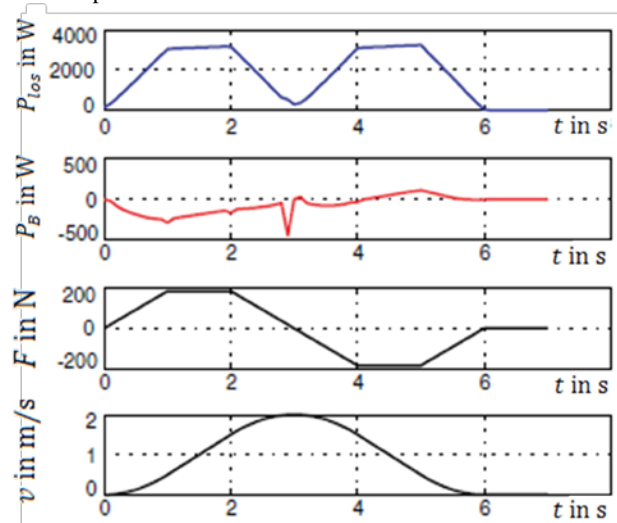


ABB. 9: WERTE DER ZIELFUNKTIONEN ENTLANG EINES PFADES

Dabei zeigt sich eine höhere übertragene Leistung in der Abbremsphase, welche die Möglichkeit des Linearmotors veranschaulicht, kinetische Energie zur Aufladung des Energiespeichers zu nutzen. Genau so offensichtlich in Abb. 9 ist eine Spitze der übertragenen Leistung wenn die Schubkraft F_M durch Null geht. In diesem Punkt wird der Sekundärstrom zu Null geregelt, was bedeutet, dass die Zielvorgaben auch Null werden. Daher ist eine Onlineoptimierung für diesen Punkt weder möglich noch nötig. In solchen Fällen steuert eine einfache Heuristik das System ein und fordert andererseits GAIO dazu auf, die Algorithmen zur Pfadverfolgung wieder neu zu starten.

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über den Einsatz eines doppelt gespeisten Asynchron-Linearmotors für ein neuartiges schienengebundenes Transportsystem. Mit diesem Motor kann sowohl im Stand wie während der Fahrt Energie vom Primär- in den Sekundärteil übertragen werden. Die Regelung der

Schubkraft und Energieübertragung bei mehreren, sich zu einander relativ bewegenden Fahrzeugen auf einem Statorabschnitt (Konvoi Betrieb), sowie die Synchronisation des Primär- und Sekundärfeldes wurde erläutert. Die Anwendung von Methoden der Mehrzieloptimierung zur Antriebsregelung und zur Bestimmung eines intelligenten Energiemanagements in Verbindung mit einem hybriden Energiespeicher ermöglichen die situationsgerechte Priorisierung verschiedener Ziele wie Effizienz und Verfügbarkeit.

QUELLEN

- [1] [Online], <http://www-nbp.upb.de/>.
- [2] M. Henke, H. Grotstollen, "Modelling and Control of a Longstator-Linearmotor for a Mechatronic Railway Carriage," 1st IFAC Symposium on Mechatronic Systems, pp. 353-357, Darmstadt, Germany, 2000.
- [3] M. Henke, H. Grotstollen, H. "Control of a Linear Drive Test Stand for the NBP Railway Carriage," 3. Symposium on Linear Drives for Industrial Applications (LDIA), S. 332-336, Nagano, Japan, 2001.
- [4] A. Pottharst, "Energieversorgung und Leittechnik einer Anlage mit Linearmotor getriebenen Bahnfahrzeugen," PhD-Thesis, University of Paderborn, Power Electronics and Electrical Drives, Germany, 2005.
- [5] T. Schneider, B. Schulz, C. Henke, K. Witting, D. Steenken, J. Böcker, "Energy Transfer via Linear Doubly-Fed Motor in Different Operating Modes", Proc. International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC2009), Miami, Florida, 2009
- [6] C. Henke, M. Tichy, T. Schneider, J. Böcker, Wilhelm Schäfer, "Organization and Control of Autonomous Railway Convoys", 9th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC 08), October 6 - 9, 2008, Kobe, Japan, 2008
- [7] H. Grotstollen, "Design of Long-Stator Linear Motor Drive for RailCab Test Track", ICPE'04, Intern. Conference on Power Electronics, Busan, South Korea, Okt. 2004. Also published in JPE, Vol. 5, No. 2, April 2005, pp. 190-204.
- [8] A. Pottharst, H. Grotstollen, "Distributed Control Structure of the NBP Test Track with Linear Motor Driven Vehicles", International Embedded Systems Symposium, August 15-17, 2005, Manaus, Brasil. Published in: From Specification to Embedded Systems Applications, Springer, 2005, pp. 235-243.
- [9] A. Pottharst, C. Henke, T. Schneider, J. Böcker, H. Grotstollen, "Drive Control and Position Measurement of RailCab Vehicle Driven by Linear Motors", Sixth International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Sensors, Automatic Measurement, Control, and Computer Simulation, Jiancheng Fang; Zhongyu Wang, Editors, 63582C Date: 30 October 2006.
- [10] C. Romaus, J. Böcker, K. Witting, A. Seifried, O. Znamenshchikov; "Optimal Energy Management for a Hybrid Energy Storage System Combining Batteries and Double Layer Capacitors." 1st IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2009), San Jose, California, USA, 2009.
- [11] P. Adelt, J. Donoth, J. Gausemeier, J. Geisler, S. Henkler, S. Kahl, B. Klöpffer, A. Krupp, E. Münch, S. Oberthür, C. Paiz, H. Podlogar, M. Porrmann, R. Radkowski, C. Romaus, A. Schmidt, B. Schulz, H. Vöcking, U. Witkowski, K. Witting, O. Znamenshchikov; "Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte", Band 234 der HNI Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Deutschland, 2008.
- [12] B. Klöpffer, C. Romaus, A. Schmidt, H. Vöcking; "A Multi-Agent Planning Problem for the Coordination of Functions Modules," In: J. Gausemeier, F. Rammig, W. Schäfer, (Hrsg): 7th International Heinz Nixdorf Symposium – Selfoptimizing Mechatronic Systems: Design the Future, Band 223 der HNI-Verlagsschriftenreihe, Seiten 377 – 393. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Germany, 2008.
- [13] B. Klöpffer, C. Romaus, A. Schmidt, H. Vöcking, J. Donoth; "Defining Plan Metrics for Multi-Agent Planning Within Mechatronic Systems," International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (AME), New York, USA, 2008.
- [14] Lehrstuhl für Angewandte Mathematik, Universität Paderborn: GAIO – Global Analysis of Invariant Objects. <http://math-www.uni-paderborn.de/~agdellnitz>.