

Redundante Positionserfassung für ein spurgeführtes linearmotorgetriebenes Bahnfahrzeug

Tobias Schneider, Bernd Schulz, Christian Henke, Joachim Böcker
Universität Paderborn, Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik
Warburger Straße 100, 33098 Paderborn
Tel.: 05251/605482, Fax.: 05251/605483
schneider@lea.upb.de

Zusammenfassung

Auf einer Versuchsanlage der Universität Paderborn wird der autonome Betrieb von spurgeführten Fahrzeugen (Railcabs) erforscht. Einen wesentlichen Aspekt stellt dabei die Regelung von doppelt gespeisten Asynchron-Linearantrieben dar. Eine Herausforderung ergibt sich aus den räumlich verteilten Motorkomponenten. Die Schubkraftherzeugung setzt eine phasenrichtige Abstimmung der Wanderwellen der Läufer- und Statorsegmente voraus. Im Hinblick auf einen sicheren und zuverlässigen Betrieb des Linearantriebs wird in diesem Beitrag neben den redundanten Sensorsystemen auch ein Algorithmus zur Verbesserung der Antriebsregelung vorgestellt.

Ausgehend vom Modell des doppelt gespeisten *Linearantriebs* werden in Abschnitt 2 die Phasenbeziehungen zwischen stator- und läuferseitiger Wanderwelle dargestellt. In Abschnitt 3 wird die *Positionserfassung und zeitliche Synchronisation* mittels in den Rädern angebrachten Inkrementalgebern, sowie deren Kalibrierung mittels redundanter Sensorik erläutert. Um die durch Spurkranzanläufe verursachten Messfehler zu kompensieren, wurde eine weitere Methode zur Erfassung der für die Antriebsregelung erforderlichen relativen Phasenlage entwickelt. Die dabei verwendeten *Hallsensoren mit Nachlaufsynchronisation (PLL)* werden in Abschnitt 4 beschrieben. Durch die dargestellten Messungen werden die Grenzen dieses Verfahrens aufgezeigt.

Ein Algorithmus zur Erhöhung der *Zuverlässigkeit durch Redundanz* ist in Abschnitt 5 skizziert. Dabei werden Plausibilitäts- und Qualitätsbewertungen in ein Zustandsüberwachungskonzept integriert.

Schlüsselwörter:

Linearantrieb, Plausibilitätsbewertung, Zuverlässigkeit, Synchronisation, Zustandsüberwachungskonzept

1 Einleitung

An der Universität Paderborn ist im Rahmen des Forschungsprojekts *Neue Bahntechnik Paderborn* eine Außenanlage zur Erforschung von autonomen Linear-motor getriebenen Schienenfahrzeugen entstanden. Die so genannten Railcabs sind schienengebundene Fahrzeuge im Maßstab 1:2,5 und können auf dem 530 m langen Schienennetz der Versuchsanlage eine maximale Geschwindigkeit von 36 km/h erreichen. Die Fahrzeuge selbst sind komplexe mechatronische und modular aufgebaute Systeme. Das Antriebsmodul wird durch den doppelt gespeisten Linearmotor realisiert, welcher zusätzlich eine berührungslose Energieübertragung ins Fahrzeug ermöglicht. Zudem sind auf den vollautomatisierten Fahrzeugen Spurführungs- und Neigetechnikmodule integriert [GPR+04].

Sicherheit und Zuverlässigkeit der autonomen Fahrzeuge sind in der Konstruktionsphase des Systems in den Mittelpunkt gestellt worden. So wurde eine Vielzahl von Redundanzkonzepten für die Funktionsmodule entwickelt [MPV+04]. Für eine Realisierung im Maßstab 1:1 muss die Verlässlichkeit aller Funktionsmodule weiter erhöht werden. Der Focus dieses Beitrags liegt auf der Erhöhung der Zuverlässigkeit des Antriebsmoduls.

2 Linearantrieb

Die Funktionsweise des doppelt gespeisten Asynchron-Linearmotors (DGALM) lässt sich mit der eines rotierenden Asynchronmotors vergleichen, dessen Stator abgerollt in einer Ebene liegt. Die Statorelemente sind in 6 m lange Abschnitte unterteilt, die längs der Strecke im Gleisbett liegen und separat von einem Umrichter bestromt werden. Der Läufer besteht aus insgesamt vier Segmenten, die starr miteinander verkoppelt und an der Unterseite des Fahrzeugs befestigt sind (Abb. 1). Der Luftspalt zwischen Stator und Läufer beträgt 12 mm. Durch die unabhängige Speisung der beiden Motorkomponenten ist es möglich, die durch den Stator- und den Läufer-Strombelag erzeugten Magnetfelder relativ zueinander auszurichten und auf diese Weise die gewünschte Schubkraft einzustellen.

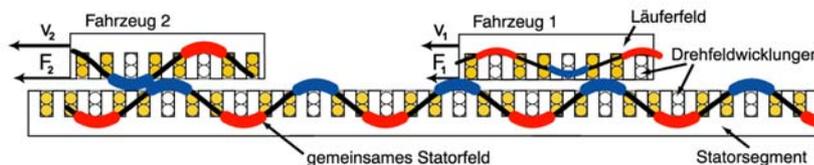


Abbildung 1: Linearmotorprinzip

Voraussetzung für optimale Kraftbildung ist eine orthogonale Ausrichtung des Statormagnetfelds zum Läufermagnetfeld (siehe Kap. 3). Bewegt sich die magnetische Wanderwelle im Stator mit einer Geschwindigkeit v_S und die

magnetische Wanderwelle im Läufer mit der Geschwindigkeit v_L , dann ergibt sich die mechanische Geschwindigkeit v_m des Fahrzeugs zu $v_m = v_S - v_L$.

Die Beziehung zwischen Läuferwinkel φ_L und Statorwinkel φ_S ist abhängig von der relativen Position des Läuferelements und dessen Polteilung τ_p :

$$\varphi_L(t) + x(t) \frac{\pi}{\tau_p} = \varphi_S(t) \quad (2.1)$$

Daher ist für die Antriebsregelung auf dem Fahrzeug eine Erfassung der relativen Lage der Wanderwelle des Statorstroms unumgänglich (Statorstromphase). Dies kann durch Messung der Fahrzeugposition und eine zeitsynchrone Stromvorgabe erfolgen oder durch direkte Messung der auftretenden Magnetfelder.

3 Positionserfassung und zeitliche Synchronisation

Zur Erfassung der Fahrzeugposition sind die Räder des Versuchsfahrzeugs mit Inkrementalgebern ausgestattet. Auf Basis dieser Information erfolgen die Umschaltungen der aktiven Statorabschnitte (absolute Position) und die Regelungen der Läuferströme (relative Position). Die relative Position muss genau bestimmt werden, da bereits ein Messfehler von 1 cm zu einer Kraftereinbuße von ca. 5% führt. Bei einem Fehler von 5 cm geht die Schubkraft völlig verloren. Die Positionserfassung über die Raddrehung führt jedoch aufgrund des Schlupfes, insbesondere im Fall eines Spurkranzanlaufs zu Fehlern. Um die auftretenden Fehler klein zu halten, erfolgt ein regelmäßiger Abgleich der Position durch Referenzmarken auf der Strecke.

Dieser Abgleich wird redundant sowohl durch einen induktiven Näherungsschalter mit besonderen Referenzmarken als auch durch einen Infrarot-Sensor, welcher die Spalten zwischen den einzelnen Statorelementen detektiert [Gro05], realisiert (Abb. 2). Insbesondere bei den Näherungsschaltern sind bei höheren Geschwindigkeiten systembedingte Verzögerungen zu berücksichtigen.

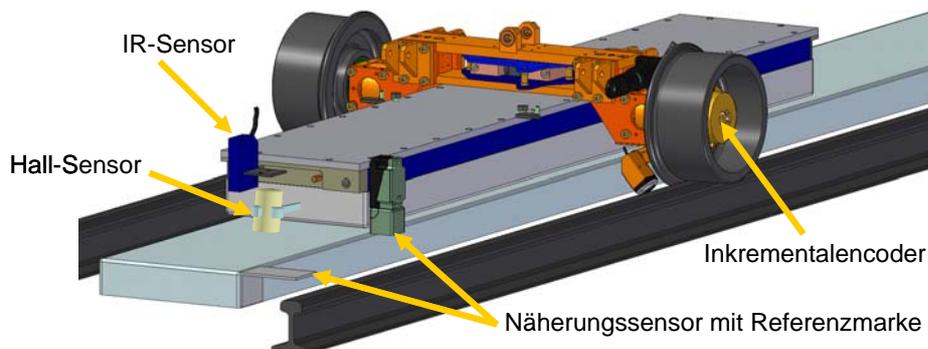


Abbildung 2: Fahrzeug-Achse mit Linearmotor und Sensorik

Die Antriebsregelung sendet mittels eines Funkmodems Sollwerte für die Leistungselektronik (Statorstrom, Statorfrequenz) sowie für den aktuellen Statorabschnitt an den Leitreechner der Strecke. Die Übertragung der Sollwerte vom Fahrzeug an die Strecke muss harten Echtzeitbedingungen genügen [Pot05]. Aus diesem Grund wird die Sollfrequenz der Statorwanderwelle auf dem Streckenrechner innerhalb eines Übertragungsfensters zeitlich synchron aufintegriert. Diese Berechnung der Statorstromphase findet dazu parallel auf dem Fahrzeug statt und bildet so die Basis der verteilten Systeme für die am Statorstrom orientierte Stromregelung. Die zeitliche Synchronisation über den echtzeitfähigen Kommunikationskanal hat sich auf der NBP-Versuchsanlage als ein zuverlässiges Werkzeug zur Bestimmung der Statorstromphase erwiesen. Allerdings ist die exakte Bestimmung der Position des Fahrzeugs und damit die relative Ausrichtung der Wanderwellen zueinander nicht immer optimal. Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Antriebsregelung ist neben der Kombination der dargestellten Verfahren eine weitere Möglichkeit entwickelt worden, die mittels Hall-Sensor das örtliche Statormagnetfeld bestimmt.

4 Hallsensor mit Nachlaufsynchronisation (PLL)

Mittels eines Hall-Sensors, der das Magnetfeld des Stators detektiert, und einer Nachlaufsynchronisation (PLL) lässt sich direkt die aktuelle Phasenlage der Statorwanderwelle ermitteln. Die PLL ist ein Regelsystem (Abb. 3), das einen internen Oszillator auf ein von außen zugeführtes Eingangssignal (Hall-Sensor) synchronisiert [Bes03]. Bei der realisierten PLL wird das Referenzsignal so an das Eingangssignal angeglichen, dass es die gleiche Frequenz und Phase besitzt.

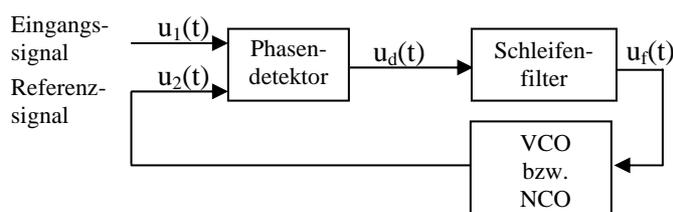


Abbildung 3: Blockschaltbild einer PLL

Ein Sprung der Statorstromfrequenz, z. B. durch Umschalten eines neuen Sollwerts, muss durch die PLL möglichst schnell ermittelt werden. Dabei sind die Synchronisierungszeiten des Referenzsignals mit dem Eingangssignal (Hallsensor) abhängig von Frequenz und Größe des Phasensprungs. Die Zeiten bis zum letzten Eintauchen des Referenzsignals in ein Toleranzband (Einrastzeit) nehmen mit kleiner werdenden Frequenzen zu [Mor04]. Der Phasenfehler während dieser Zeit verursacht in Verbindung mit der Läuferstromregelung eine signifikante Abnahme der Schubkraft. In Abb. 4 ist der gemessene Verlauf der Vorschubkraft des Linearmotors bei verschiedenen großen Frequenzsprüngen dargestellt. Da auf

Grund des Messaufbaus nur Zugkräfte gemessen werden können, erfolgte eine Schubsollkraftvorgabe von -100 N.

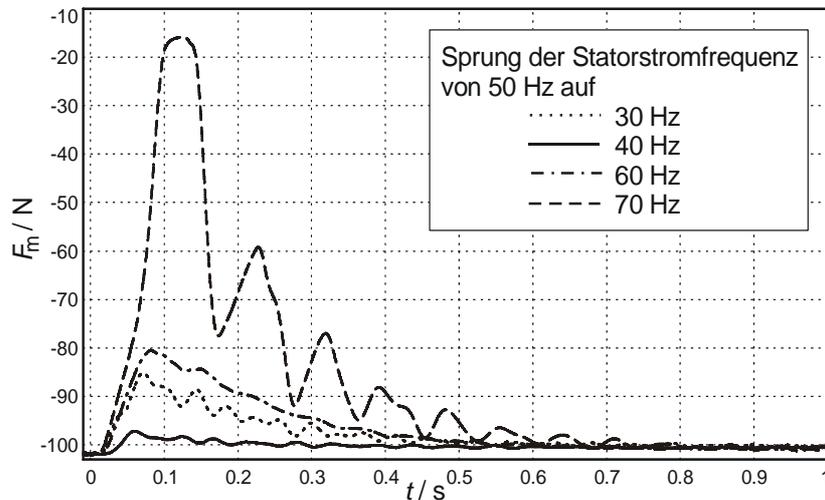


Abbildung 4: Messung der Zugkräfte bei verschiedenen Sprüngen

Die Ermittlung der Statorstromphase, ausschließlich basierend auf Hallsensoren und PLL, kann nur bedingt für eine zuverlässige Regelung verwendet werden, da für den sicheren Fahrbetrieb eine kontinuierliche Antriebskraft bereitgestellt werden muss.

5 Zuverlässigkeit durch Redundanz

Grundlage für einen zuverlässigen Betrieb der Versuchsfahrzeuge ist die erwartungstreue Ermittlung der für die Antriebsregelung erforderlichen physikalischen Größen, insbesondere der relativen Ausrichtung des Statorstroms zum Fahrzeug. Die dafür benötigte redundante Auslegung der Sensorik erhöht nicht nur die Ausfallsicherheit, sondern auch die Qualität der Regelgrößen. Dazu ist ein Zustandsüberwachungskonzept erforderlich (Abb. 5), welches die Plausibilität und Qualität der einzelnen Messwerte einschätzt.

Die Werte der Inkrementalgeber werden gemittelt (\bar{x}_{rel}) und die Streuung jedes einzelnen vom Mittelwert berechnet. Dadurch wird eine qualitative Bewertung der ermittelten Position realisiert. Ausgehend von der aktuellen Geschwindigkeit v_m und des Verfügbarkeitszustands erfolgt eine Entscheidung, welches der Kalibrier-signale von Näherungsschalter und IR-Sensor genutzt wird.

Sowohl die Luftspaltbreite als auch die Referenzmarkenbreite sind bekannt und werden durch Geschwindigkeit und Dauer des Detektionssignals auf ihre Plausibilität nach dem gleichen Prinzip überprüft. Nach erfolgter Kalibrierung steht die geschätzte relative Lage \hat{x}_{rel} zur Verfügung. Durch Berücksichtigung der synchronen Kommunikation wird aus der relativen Lage ein Schätzwert für die relative Phasenlage des Statorstrom $\hat{\varphi}_{S1}$ berechnet.

Das durch Hallsensoren ermittelte Signal wird nach der Verarbeitung in der PLL ebenfalls hinsichtlich Qualität bewertet. Dadurch wird der Verfügbarkeitszustand für das PLL-Ausgangssignal $\hat{\varphi}_{S2}$ festgelegt. Das Ausgangssignal wird als gültig gekennzeichnet, wenn der Synchronisierungsvorgang abgeschlossen bzw. die PLL eingerastet ist.

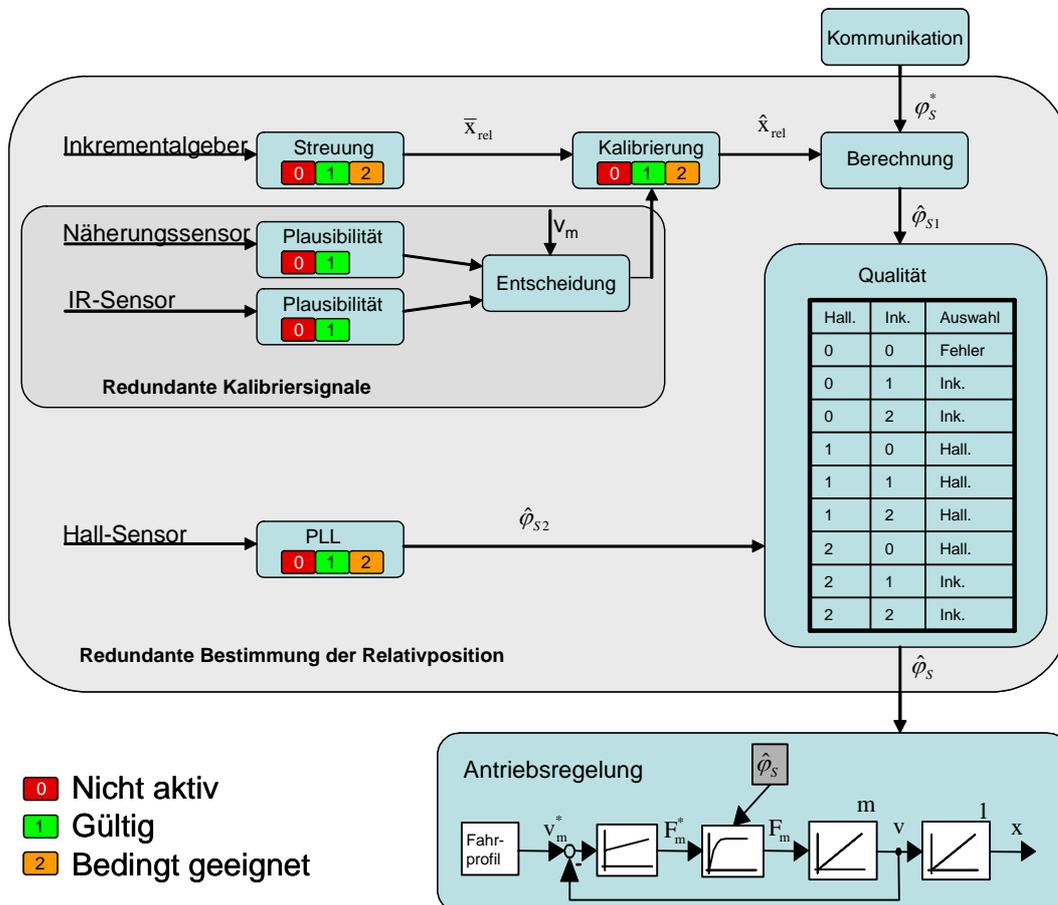


Abbildung 5: Zustandsüberwachungssystem zur Bewertung der Sensorsignale

Die Qualitätsbewertung auf Basis der Verfügbarkeitszustände der beiden redundanten Phasenlagen $\hat{\varphi}_{S1}$ und $\hat{\varphi}_{S2}$ liefert die für die Antriebsregelung relevante Größe $\hat{\varphi}_S$. Die Entscheidung erfolgt über ein Look-Up-Table. Das bedingt geeignete PLL-Ausgangssignal impliziert wesentlich größere Schubkräfteinbrüche als das Äquivalent der Inkrementalgeber. Aus diesem Grund wird bei zwei bedingt geeigneten Phasenlagen auf die Inkrementalgeber zurückgegriffen. Allerdings sollten im Falle einer synchronisierten PLL auch im Hinblick auf eine zukünftige Realisierung im Maßstab 1:1 immer die Werte der Hall-Sensoren genutzt werden. Das Zustandsüberwachungskonzept gewährleistet somit eine ausfallsichere und damit zuverlässigere Bereitstellung des Schätzwertes.

Abbildung 6 zeigt die Integration des oben skizzierten Algorithmus in die Stromregelung des fahrzeugseitigen Teils des Antriebs [Hen03]. Dabei ist die Auswahl

der redundanten Kalibriersignale nicht dargestellt und die neu hinzugefügten Elemente dunkelgrau gekennzeichnet.

Die überlagerten Regelungen für Fahrzeuggeschwindigkeit und -position sowie die statorseitigen Stromregelungen werden durch die hinzugekommene Redundanz nicht beeinflusst.

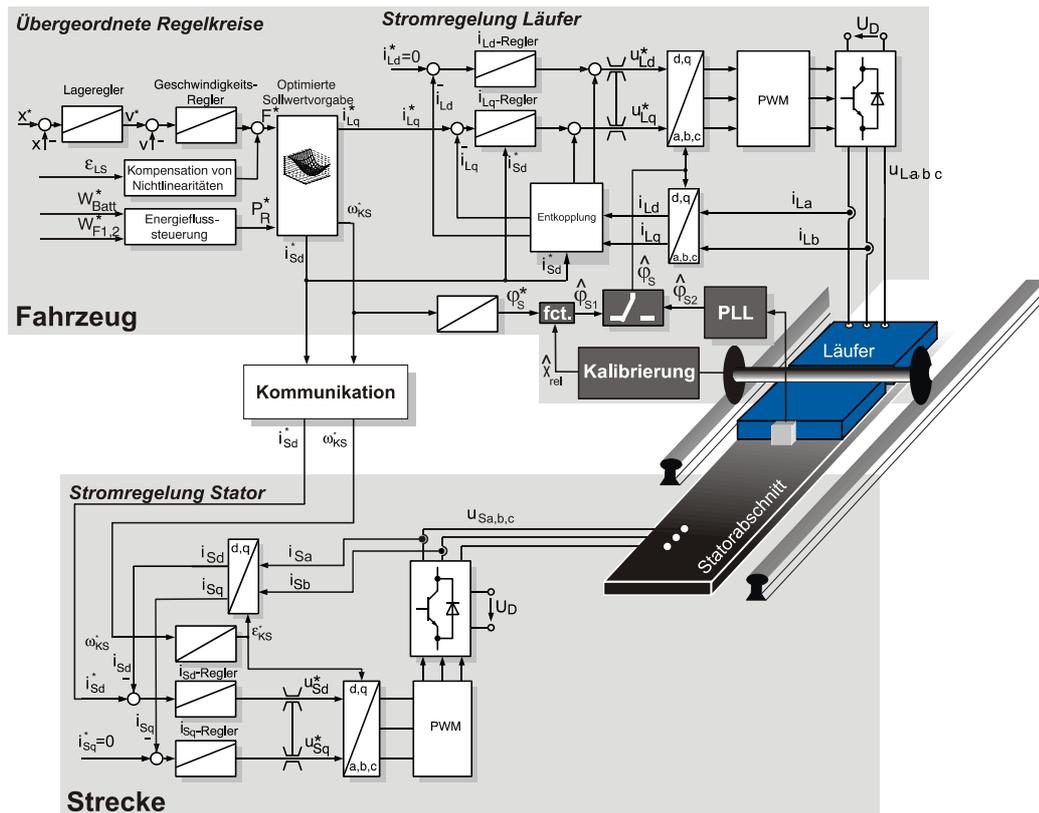


Abbildung 6: Wirkungsplan der Antriebsregelung mit erhöhter Zuverlässigkeit

6 Fazit und Ausblick

Die entwickelten und messtechnisch erprobten Verfahren zur Bestimmung der relativen Phasenlage des Statorstroms werden durch das leistungsfähige Zustandsüberwachungskonzept so miteinander kombiniert, dass sich die Zuverlässigkeit der Antriebsregelung signifikant erhöht. Dabei werden die nachteiligen Eigenschaften der beiden Einzelverfahren kompensiert. Dies sind insbesondere die frequenzabhängigen Einrastzeiten der PLL, die bei kleinen Relativgeschwindigkeiten besonders kritisch sind, und die Messfehler der Inkrementalgeber durch Spurkranzanläufe.

In der Zukunft soll die PLL um eine Vorsteuerung erweitert werden, um so die Verfügbarkeit der von ihr ermittelten relativen Phasenlage zu verbessern. Die Erweiterung der Positionserfassung um ein GPS-System bietet die Möglichkeit, entweder auf die Inkrementalgeber ganz zu verzichten, oder auf diesem Wege die Redundanz im System weiter zu erhöhen.

Literatur

- [Bes03] Best, R. E.: Phase-locked loops. 5. Auflage, McGraw-Hill, 2003.
- [Gro05] Grote, T.: Verfahren zum Abgleich eines Lagegebersystems für ein Schienenfahrzeug mit doppelt gespeistem Linearmotor. Studienarbeit, LEA, Universität Paderborn, 2005.
- [GPR+04] Grotstollen, H.; Pottharst, A.; Richard, H. A.; Sander, M.: Versuchsstrecke und Antriebskonzept für die Neue Bahntechnik Paderborn. Elektrische Bahnen (eb), Heft 6, 2004.
- [Hen03] Henke, M.: Antrieb mit doppeltgespeistem Linearmotor für ein spurgeführtes Bahnfahrzeug. Dissertation, LEA, Universität Paderborn, Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 533, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003
- [MPV+04] Müller, T.; Potthast, C.; Vöcking, H.; Hestermeyer, T.: Detection and Compensation of Position Sensor Faults in an Active Suspension System for a Railway Carriage. ICFA-1, Lissabon, Portugal, 2004.
- [Mor04] Morgenstern, U. : Bestimmung der relativen Lage des magnetischen Statorfeldes eines Linearmotors mittels Hall-Sensor und PLL-Auswertung. Studienarbeit, LEA, Universität Paderborn, 2004.
- [Pot05] Pottharst, A.: Energieversorgung und Leittechnik einer Anlage mit Linearmotor getriebenen Schienenfahrzeugen. Dissertation, Paderborn 2005.