

Kommunikationssysteme einer Anlage mit doppelt gespeistem Linearmotor

Dipl.-Ing. Andreas Pottharst, Dipl.-Ing. Bernd Schulz, Prof. Dr. Ing. Joachim Böcker
Universität Paderborn, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik,
Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik
Pohlweg 47 - 49, 33098 Paderborn
Tel.: ++49 - 5251 - 605482, Fax.: ++49 - 5251 - 605483, Email: Pottharst@lea.upb.de

Communication Systems of a Transportation System with a Doubly-fed Linear Motor

In the course of the NBP (Neue Bahntechnik Paderborn) project a test track is used for investigations on autonomous railway vehicles (railcabs) driven by linear motors. At this test track the linear motors are of the doubly-fed type, which is used to transfer energy to the railcabs. In accordance with the two parts of the linear motor being distributed to the vehicles and the track the drive control hardware consists of different units, which are distributed to stationary plants and the moving shuttles. Communication between these control units is realized via CANopen and via radio. To make a save drive control possible the communication has to fulfill strong realtime requirements.

Keynotes: radio system, fieldbus, distributed systems, linear motor

1. Einführung und Überblick

An der Universität Paderborn ist im Laufe des Forschungsprojekts Neue Bahntechnik Paderborn (NBP) eine Außenanlage zur Untersuchung von Schienen gebundenen, Linearmotor getriebenen Kleinfahrzeugen entstanden. Auf der 530 m langen Anlage sollen maximal zwei Kleinfahrzeuge, so genannte Railcabs (s. Bild 1a), gleichzeitig mit einer maximalen Geschwindigkeit von 36 km/h betrieben werden. Die Railcabs haben ein Gewicht von ca. 1200 kg besitzen eine Länge von ca. 3 m und eine Höhe und Breite von jeweils 1,2 m.

Bei dieser Anlage wird ein doppelt gespeister Linearmotor zum Antreiben und Bremsen der vollautomatisierten Fahrzeuge verwendet. Der Antrieb besteht hierbei aus zwei unabhängig voneinander bestromten, mit Drehfeldwicklungen ausgerüsteten Komponenten: Der Stator wird entlang der Strecke zwischen den Führungsschienen verlegt und der Läufer ist an der Unterseite des Fahrwerks befestigt. Der Stator entlang der Strecke ist in Abschnitte von je 6 m unterteilt, wobei jedem Abschnitt ein eigener Umrichter zugeordnet wird.

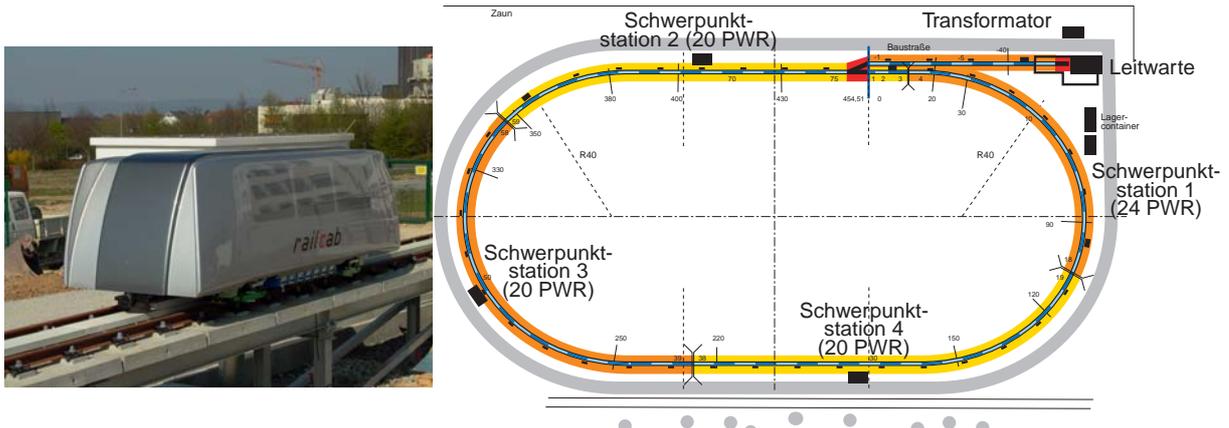


Bild 1: a) Railcab auf der Strecke
b) Elektrotechnische Verschaltung der Versuchsanlage

Diese Umrichter für die insgesamt 84 vorhandenen Statorabschnitte werden in vier Schwerpunktstationen entlang der NBP-Versuchsanlage gebündelt (s. Bild 1b), um zum Einen die Länge der Motorkabel der jeweiligen Abschnitte und zum Anderen den Aufwand bei der Netzeinspeisung der Umrichter zu minimieren, sodass ein Kosten optimierter Aufbau der Elektrotechnik der Anlage realisiert werden konnte. Ferner erwies sich die hier favorisierte Lösung, jedem Abschnitt mit einem eigenen Umrichter auszurüsten, im Vergleich zur herkömmlichen Lösung, jedem Fahrzeug zwei streckenseitige Umrichter zuzuordnen, welche über Thyristor- oder Schützschiene mit den jeweiligen Statorabschnitten verbunden werden, als günstiger. Die Gründe hierfür liegen vor allem in einem wesentlich geringeren Aufwand für die Motorverkabelung und darin, dass die 84 streckenseitigen Umrichter auf Grund ihrer niedrigen Einschaltdauer mit 180% Überlast betrieben werden. Außerdem gestaltete sich die Realisierung mit den entlang der Strecke verteilten Umrichtern wesentlich flexibler, da z.B. bei einem zukünftig angestrebten Betrieb mit mehr als zwei Railcabs nicht für jedes zusätzliche Fahrzeug neue Ringleitungen mit den dazugehörigen Schaltmechanismen in der Strecke installiert werden müssen.

Bei einer asynchronen Betriebsweise des Motors kann im übersynchronen Betrieb, wenn die Geschwindigkeit der Wanderwelle im Stator größer ist als die des Railcabs, Energie ins Fahrzeug übertragen werden [1]. Somit kann auf Stromschienen oder Oberleitung zur Versorgung der Bordnetze der Railcabs verzichtet werden. Der Betrag der über den Motor übertragenen Momentanleistung ist vom Schubkraftbedarf und von der Differenzgeschwindigkeit zwischen Wanderwelle im Stator und Fahrzeug abhängig [2]. Soll der Leistungsfluss über den Motor gesteuert werden, muss z.B. die Frequenz der Wanderwelle dynamisch verstellbar sein, ohne dass hierbei die Schlupfbeziehung verletzt wird und der Motor außer Tritt gerät. Hierdurch werden hohe Anforderungen an die Kommunikationstechnik zw. der auf Fahrzeug und Strecke verteilte Informationsverarbeitung der Regelung bezüglich Datenübertragungsrate, Echtzeitfähigkeit und Sicherheit gestellt. Die Energieversorgung, Kommunikations- und Leittechnik wurde mit handelsüblicher Servo- und Informationstechnik realisiert, wie sie im Anlagenbau allgemein eingesetzt wird. So wurde auf einen CANopen-Feldbus zur Vernetzung der Umrichtertechnik sowie Funktech-

nik, wie sie vor allem auch bei SPS-Systemen eingesetzt wird, zurück gegriffen, um den Betrieb des doppelt gespeisten Linearmotors zu automatisieren und zu zeigen, dass ein System mit einem solchen Motor in jeglichen Förderanlage zum Einsatz kommen kann.

2. Leittechnik und Kommunikationssysteme

Bild 2 zeigt eine Übersicht der Betriebsleit- und Kommunikationstechnik der NBP-Versuchsanlage, welche derart realisiert wurde, dass ein autonomer Betrieb der Railcabs möglich ist. Jedes Fahrzeug besitzt hierzu einen eigenen Industrie-PC, an welchen über einen ISA-Bus echtzeitfähige Prototyping-Hardware mit zwei Power-PCs (Parallelrechner) und über 120 Aktor- und Sensor-Schnittstellen angebunden sind.

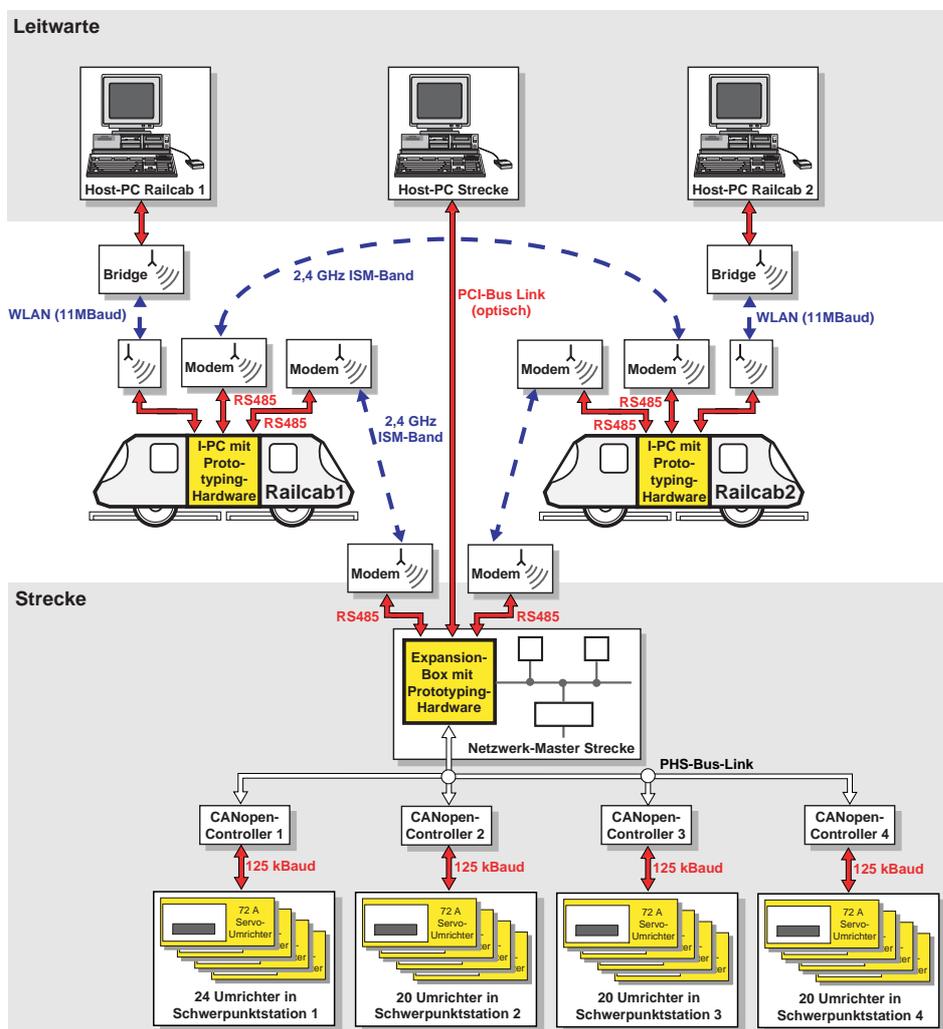


Bild 2: Übersicht der Betriebsleittechnik

Auf dieser Parallelrechnerplattform wird die gesamte Regelung eines Railcabs für den Antrieb, die aktive Feder- und Neigetechnik sowie die Spurführung des Fahrzeugs durchgeführt [3]. Der Industrie-PC eines Railcabs ist wiederum über ein

WLAN mit einem Host-PC in der Leitwarte der Anlage verbunden. Per Remote-Control kann über diese Verbindung der Betrieb eines Fahrzeugs überwacht, Messgrößen aufgezeichnet und weitere Referenzgrößen z.B. für die Konvoibildung von Fahrzeugen übermittelt werden.

Da die Schubkraft eines Railcabs proportional ist zur Stärke der Strombelagswelle in Stator und Läufer [4], werden die Statorreferenzgrößen bestehend aus Strom und Frequenz über einen weiteren Funkkanal an die streckenseitige Prototyping-Hardware mit einem angebotenen CANopen-Netzwerkmaster übermittelt. Über diesen Netzwerkmaster werden schließlich die Sollwerte an die entsprechenden Umrichter verteilt, welche den Streckenabschnitten zugeordnet sind, über denen sich das Railcab gerade befindet. Die Stromregelung für diesen Statorabschnitt selbst wird dann auf den jeweiligen Umrichtern gerechnet. Bei diesem Vorgang müssen die Steuerungen der auf der Strecke verteilten Umrichter untereinander synchronisiert werden, damit bei der Weiterschaltung der Wanderwelle von einem Statorabschnitt auf den nächsten kein Winkelfehler entsteht und es zu einem Sprung in der Wanderwelle kommt. Außerdem ist es aus energetischen Gründen sinnvoll, die Bestromungsdauer der jeweiligen Statorabschnitte in Abhängigkeit der übermittelten Fahrzeugposition zu minimieren.

Da die Stromregelungen für Läufer und Stator in einem Statorstrom orientiertem Koordinatensystem durchgeführt werden [5], muss die momentane Lage des elektrischen Feldes im Stator der Informationsverarbeitung auf dem Railcab bekannt sein, damit das elektromagnetische Feld im Läufer so gestellt werden kann, dass eine optimale Schubkraftbildung möglich wird. Die Kommunikationswege über den Feldbus und die Funktechnik sind somit unter Echtzeitbedingungen in die Fahrzeugregelung eingebunden. Um dieser Echtzeitanforderung gerecht werden zu können, wurde ein Synchronisationsmechanismus für die verteilte Regelungshardware in Strecke und Fahrzeug entworfen. Arbeitet dieser Mechanismus fehlerhaft, kann dies unter Umständen dazu führen, dass das Fahrzeug plötzlich in entgegengesetzter Richtung beschleunigt und es zu undefinierten Systemzuständen kommen kann. Ein sicherer Betrieb der Anlage könnte unter diesen Umständen nicht mehr gewährleistet werden.

3. Synchronisationsmechanismus der verteilten Steuerungshardware

Bild 3 zeigt das Sequenzdiagramm der funkgesteuerten Synchronisation von der verteilten Informationsverarbeitung in Fahrzeug und Strecke für die Stromregelungen der beiden Linearmotorteile. Ausgehend von einem Polling-Byte, welches nach einem festen Timer-Zyklus über die Funkstrecke an das Fahrzeug gesendet wird, wird die Statorsollwertübertragung an die streckenseitige Kommunikationseinheit angeregt. Das Polling-Byte selbst wird kodiert, um Fehlerzustände bei der Datenübertragung und den Zustand der Streckenabschnitte auf dem Railcab erkennen zu können. Ein deterministisches Systemverhalten liegt vor, da gleichzeitig mit Versenden des Polling-Bytes eine Synchronisations-PDO (Process Data Objekt) an alle

streckenseitigen Umrichter über den CANopen-Feldbus versandt wird. Erst nach dessen Empfang werden die vorher über den Bus übermittelten Statorsollwerte auf die jeweiligen Stromregelungen aufgeschaltet.

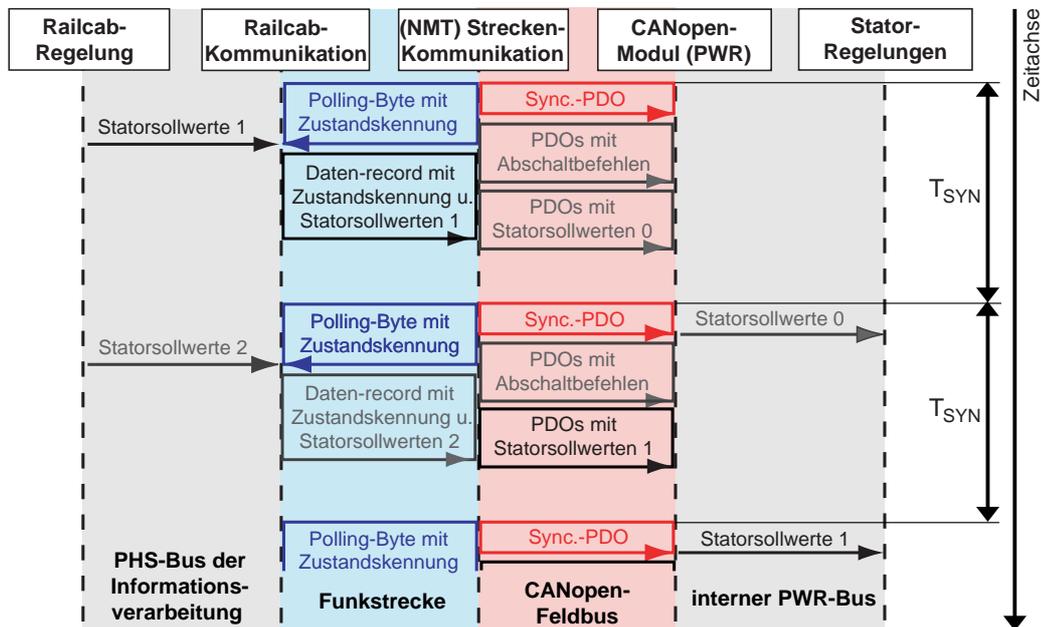


Bild 3: Sequenzdiagramm der Kommunikation

Durch genaue Kenntnis der Totzeiten, hervorgerufen durch die Kommunikationswege und der Ersatzzeitkonstanten der Stromregelungen, können die Wanderwellen in Läufer und Stator dann optimal zueinander gestellt werden. Mithilfe der aufgebauten Kommunikationstechnik können die Statorsollwerte an der Anlage alle 44 ms verstellt werden. Da der über die Statorstromregelung einzuprägende Wert der elektrischen Lage im 4-kHz-Takt für die Regelalgorithmen einfließen muss und im Vergleich hierzu die Statorreferenzen durch die Kommunikationskanäle nur recht langsam verstellt werden können, wird die Sollfrequenz der Statorwanderwelle jeweils synchron innerhalb der Informationsverarbeitung von Strecke und Shuttle aufintegriert. Hierzu wird auf den in Bild 4 dargestellten diskreten Integrator zurückgegriffen.

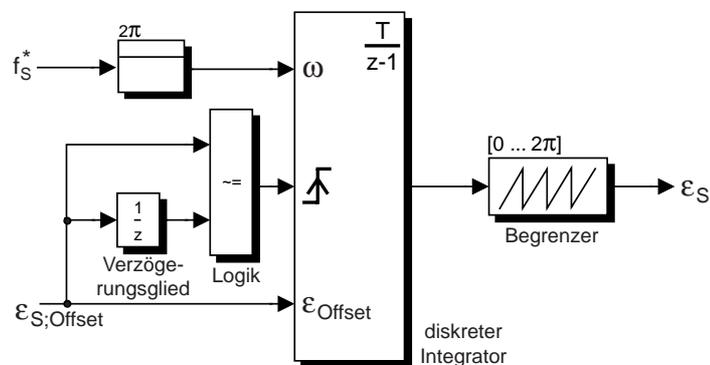


Bild 4: Aufintegration der Sollfrequenz mit Reset und Offset-Winkel

Um eine Abgleichmöglichkeit der beiden auf unterschiedliche Verarbeitungssysteme verteilten Integratoren zu ermöglichen, wird neben den Statorsollgrößen für Stromamplitude und Frequenz f_S^* zusätzlich zyklisch ein Offsetwinkel $\varepsilon_{S;Offset}$ für die elektrische Statorlage übermittelt. Hierbei werden die Ausgänge der Integratoren zurück gesetzt, wenn zwei aufeinander folgende Werte für diesen Winkel unterschiedlich sind. Sollten bei einer erkannten Funkkanalstörung die empfangenen Daten verworfen werden oder sollte eine kurzfristige Unterbrechung der Funkverbindung auftreten, wird der zuletzt empfangene und als korrekt erkannte Wert beibehalten

3.1 Realisierung der Funk-Kommunikation

Die Funkstrecke wurde hierbei mittels handelsüblicher Funkmodems realisiert, wie sie z.B. auch bei SPS-Anwendungen eingesetzt werden, wenn serielle Kabelverbindungen aus Gründen der Mobilität oder der zu überwindenden Entfernung ersetzt werden sollen. Die verwendeten zulassungsfreien Geräte senden bidirektional im 2,4 GHz ISM-Band und erreichen eine digitale Datenübertragungsrate von 115,2 kBaud. Sie verfügen über eine RS485-Schnittstelle über welche sie mit der Informationstechnik in Strecke und Fahrzeug verbunden sind. Das in Bild 5 dargestellte Datentelegramm dieser Funkverbindung ist so aufgebaut, dass nach einem Startbyte neben den Statorreferenzwerten für Stromamplitude, der Frequenz und des Offsetwinkels der elektrischen Lage die Istposition des Railcabs auf der Strecke auf 6 Datenbytes kodiert werden. Abgeschlossen wird dieses Telegramm durch ein Modulo256-Prüfbyte.

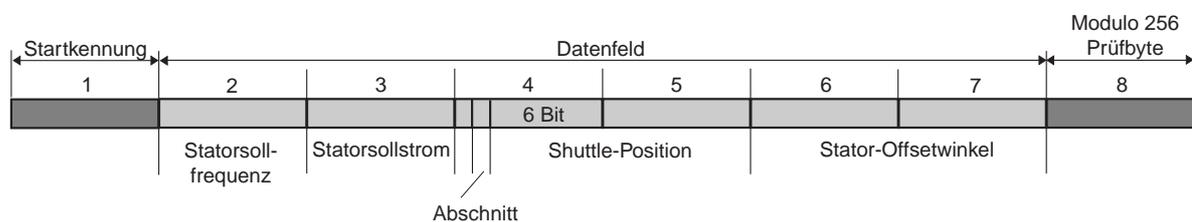


Bild 5: Datentelegramm der Funkstrecke

Bei der in Bild 5 dargestellten Realisierung hatte eine kurze Übertragungsdauer der Daten Vorrang vor einer niedrigen Quantisierung der Sollwerte. Lediglich der Statoroffsetwinkel weist eine äußerst geringe Quantisierung von unter $1/100^\circ$ auf, um eine möglichst genaue Synchronisation zwischen Stator- und Läuferfeld zu gewährleisten.

3.2 HIL-Prüfstand Funktechnik

Da die Funktionalität dieser Funkstrecke mit angebundenem Synchronisationsmechanismus von grundlegender Bedeutung für die Betriebssicherheit der NBP-Versuchsanlage ist, wurde der in Bild 6 aufgeführte HIL-Prüfstand erstellt, um einen Nachweis der Funktionalität erbringen zu können und jegliche Störungen und Kontaktabbrüche zu simulieren. Hierzu wurden zwei getrennte Prototyping-Systeme

jeweils mit einem Power-PC und einer seriellen Schnittstelle zu einem Funkmodem in einem Industrie-PC installiert. Über einen ISA-Bus konnte eine gemeinsame Zeitachse erzeugt werden, sodass synchronisierte Messungen zeitgleich in beiden Systemen möglich sind.

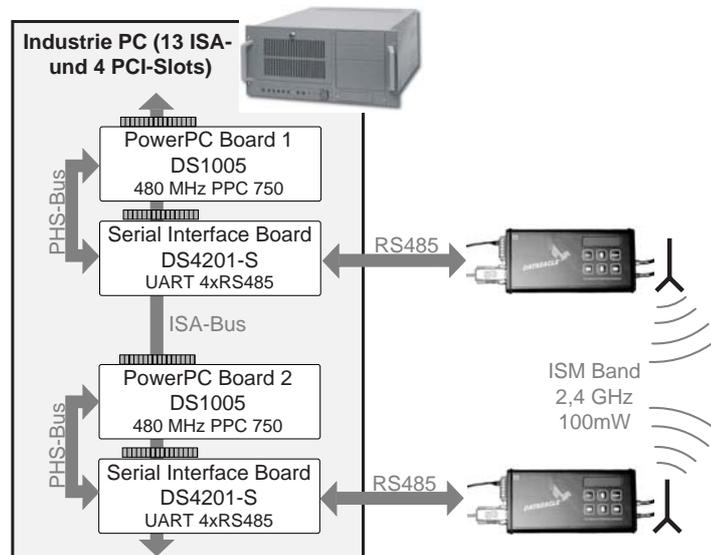


Bild 6: HIL-Prüfstand Funktechnik

Messergebnisse hierzu sind in Bild 7 dargestellt. Eine nähere Betrachtung der in Bild 7b) festgehaltenen Verläufe der für Strecke und Railcab auf getrennten Systemen berechneten elektrischen Statorlagen ε_S zeigt, dass maximal eine zeitliche Verschiebung dieser beiden Größen um die eingestellte Basisabtastrzeit der Informationstechnik von $250 \mu\text{s}$ vorliegt. Dies liegt daran, dass die Datenübertragungsdauer kein ganzzahliges Vielfaches der Basisabtastrzeit ist. Bei einer Statorfrequenz von 50 Hz hätte dies einen Winkelfehler von $4,5^\circ$ zur Folge, welcher nur einen äußerst geringen Schubkraftverlust von nur ca. 0.5% nach sich zieht.

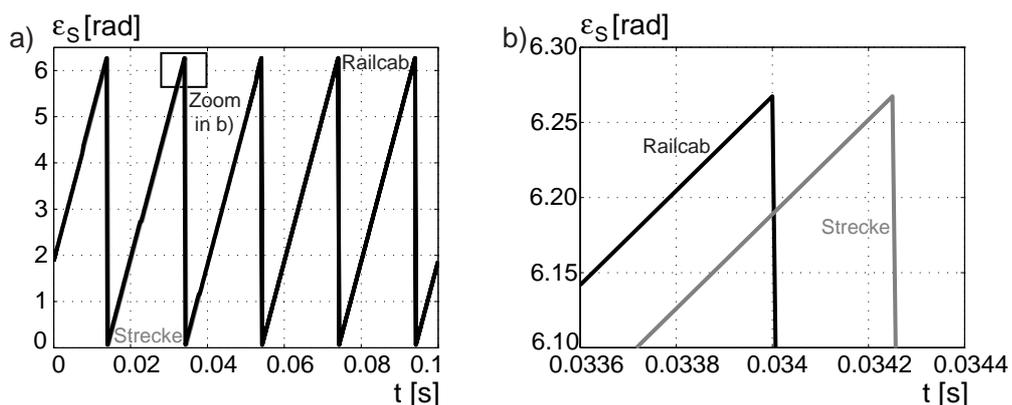


Bild 7: Verlauf der synchronisierten Statorwinkel für Strecke und Railcab

In Bild 8 sind Messungen zu einer simulierten Funkstörungen enthalten. Während des Störfalls wurde ein über die Funkstrecke übertragenes Datentelegramm als fehlerhaft erkannt und dieser Zustand über die Codierung des Pollingbytes an die fahrzeugseitige Informationstechnik übermittelt. Hieraufhin wurden die alten Statorre-

ferenzwerte beibehalten und die neuen teilweise fehlerhaft von beiden Kommunikationssystemen verworfen. Bei diesem Vorgang kam es zu keiner Differenz der berechneten elektrischen Winkel in Fahrzeug und Strecke (s. Bild 8b).

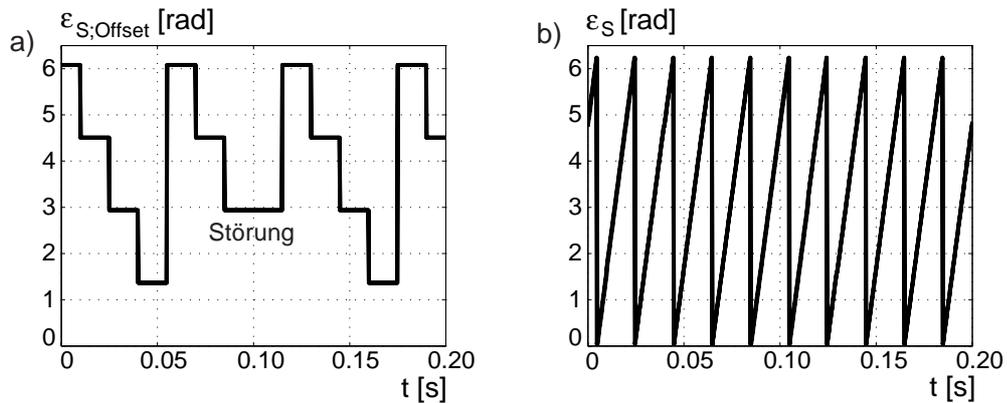


Bild 8: Verlauf der synchronisierten Statorwinkel im Störfall

Die mittels der Funkkommunikation mit angebundener Synchronisationsmechanismus übermittelten Statorreferenzen werden anschließend über einen CANopen-Feldbus an die auf die vier Schwerpunktstationen verteilten Umrichter der Streckenabschnitte übermittelt.

3.3 Feldbus-Kommunikation

Hierzu wird ein Buszyklus bestehend aus unterschiedlichen Funktionen, wie Abschalten der nicht mehr benötigten Abschnitte, Einschalten der neu zu aktivieren Abschnitte und erneute Vorgabe der Sollwerte für weiterhin aktive Abschnitte, genutzt. Ferner muss hierbei eine entsprechende Bussicherheitszeit berücksichtigt werden, um eine echtzeitfähige Buskommunikation auch bei kurzweiligen Störungen gewährleisten zu können. Bild 9 zeigt den dazu gehörigen vollständigen Buszyklus. Mit dem Empfang der Synchronisations-PDO schalten alle Umrichter ihre jeweilig zuvor empfangenen Sollwerte auf ihre Stromregelungen auf. Der Ablauf der CANopen Kommunikation entspricht dem in [6] spezifizierten Aufbau.

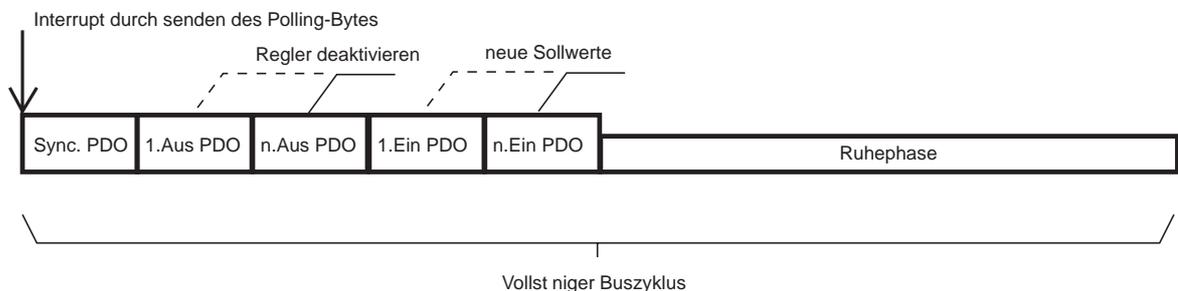


Bild 9: CANopen-Buszyklus

Der auf der Versuchsanlage realisierte CAN-Bus wird mit einer Datenrate von 125 kBaud und einer Buszykluszeit von 20 ms betrieben. Die relativ niedrige Daten-

rate ist durch die große räumliche Ausdehnung der Versuchsanlage bedingt. Der längste CAN-Bus Strang besitzt eine Länge von ca. 300 m und wird mit 21 Teilnehmern betrieben. Zwar wäre bei dieser Länge eine theoretische Datenrate von 250 kBaud möglich [7], jedoch wurde zugunsten einer größeren Übertragungssicherheit die Datenrate begrenzt.

4. Fazit und Zusammenfassung

Vorgestellt wurde eine Förderanlage mit einem doppelt gespeisten Linearmotor. Das Automatisierungssystem dieser Anlage ermöglicht einen autonomen Betrieb der schienengebundenen Versuchsfahrzeuge. Wird der doppelt gespeiste Motor in solchen Anlagen nicht nur zum Antreiben und Bremsen sondern auch zu Energieübertragung verwendet, müssen je nach Arbeitspunkt des Motors die Frequenzen der elektromagnetischen Felder in Stator und Läufer dynamisch verstellt werden, um den Leistungsfluss über den Motor steuern zu können. Bei der hier vorgestellten Anlage ist dies mit einer Totzeit von 44 ms möglich.

Für die dazu notwendigen Kommunikationssysteme der auf der NBP-Versuchsanlage verteilten Informationsverarbeitung wurden Synchronisationsmechanismen entworfen, welche für diese Anwendung einen sicheren Betrieb der Anlage gewährleisten können. Auch bei kurzzeitigem Funkwegeausfall und Störungen der Datenübertragung ist ein sicherer Betrieb der Anlage möglich, was auch durch einen bereits mehr als zwei Jahre andauernden erfolgreichen Testbetrieb der NBP-Versuchsanlage belegt ist.

5. Literatur

- [1] H. Grotstollen, A. Pottharst, M. Sander, H. Richard: *Versuchsstrecke und Antriebskonzept für die Neue Bahntechnik Paderborn*, Elektrische Bahnen 2004 Heft 6.
- [2] A. Pottharst, H. Grotstollen: *Konzept zur berührungslosen Energieübertragung mit doppeltgespeistem Langstator-Linearmotor*, SPS/IPC/DRIVES Nürnberg 2002, S. 822 - 830
- [3] J. Lückel, H. Grotstollen, K.-P. Jäker, M. Henke, X. Liu: *Mechatronic Design of a Modular Railway Carriage*, 1999 IEEE / ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Atlanta, GA, USA.
- [4] M. Henke, H. Grotstollen: *Control of a Linear Drive Test Stand for the NBP Railway Carriage*, LDIA 2001, Nagano Japan, S. 332 - 336.
- [5] M. Henke, X. Liu-Henke, J. Lückel, H. Grotstollen, K.-P. Jäker: *Design of a Railway Carriage Driven by a Linear Motor with Active Suspension/Tilt Module*, IFAC 2000, Braunschweig, S. 569-576.
- [6] CAN in Automation e.V.: *CANopen Application Layer and Communication Profile - CiA Draft Standard 301*
- [7] K. Etschberger: *Controller Area-Network*, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien 2000.