

# RailCab – Ein Schienenverkehrssystem mit autonomen, Linear-motor getriebenen Einzelfahrzeugen

## RailCab – A Railway Transportation System with Autonomously Linear Motor Driven Vehicles

Dipl.-Ing. Christian Henke, Dipl.-Math. Carsten Rustemeier, Dipl.-Ing. Tobias Schneider, Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker, Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler, Universität Paderborn, 33098 Paderborn, Germany

### Kurzfassung

Innerhalb des Forschungsprojektes NBP (Neue Bahntechnik Paderborn) wird ein völlig neuartiges Schienenverkehrssystem entwickelt, das auf kleinen, autonom verkehrenden Fahrzeugen, den so genannten RailCabs basiert. Als Antrieb dient ein doppelt gespeister Linearmotor, der zudem zur berührungslosen Energieübertragung genutzt wird. Da die Fahrzeuge sich während der Fahrt zu Konvois zusammenschließen können, sind völlig neue Funktionen der Leittechnik des Systems zu erfüllen.

### Abstract

Within the research project NBP (Neue Bahntechnik Paderborn) a new railway technology is developed, based on small, autonomously driven vehicles, so-called RailCabs. The vehicles are equipped with a doubly-fed linear motor, enabling transfer of power to the vehicle and dynamic convoy formation on the track during driving. Therefore a complex control system was designed.

## 1 Einleitung

Die heutigen Verkehrssysteme auf der Straße, aber auch auf der Schiene, stoßen sowohl im Personen-, als auch im Güterverkehr immer häufiger an ihre Grenzen. Der Individualverkehr auf der Straße bietet dabei zwar immer noch ein Höchstmaß an Flexibilität und Komfort. Diese werden jedoch durch den stetigen Verkehrszuwachs und die immer häufigeren Staus zunehmend eingeschränkt. Reise- bzw. Transportzeiten auf der Straße werden immer schlechter kalkulierbar.

Der fahrplangetriebene Schienenpersonentransport wäre dazu prinzipiell in der Lage. Die Praxis sieht jedoch mit Fahrplanverspätungen und verpassten Anschlusszügen häufig anders aus. Darüber hinaus macht häufiges Umsteigen und das Warten auf Anschlusszüge auf zugigen Bahnhöfen das Reisen mit der Bahn unkomfortabel.

Im Gütertransport besitzt die Bahn vorrangig Stärken beim Transport von Massengütern über große Distanzen. Die Gütertransportkapazitäten auf der Schiene sind aber bereits jetzt in weiten Bereichen ausgeschöpft. Den Anforderungen von Klein- und Eilsendungen kann die Bahn nicht gerecht werden.

Um den stetig steigenden Transportbedarf auch in Zukunft decken zu können, sind neue Lösungsansätze gefragt. Der Ansatz der Neuen Bahntechnik Paderborn

(NBP) besteht darin, den Widerspruch zwischen Individualverkehr und Massenverkehr aufzulösen und ihre Vorteile miteinander zu vereinen [1].

Im Folgenden werden zunächst das Systemkonzept und mögliche Anwendungsgebiete des RailCab-Systems vorgestellt. Anschließend werden das Antriebskonzept sowie der autonome Betrieb der Fahrzeuge beschrieben. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick über zukünftige Forschungsarbeiten.

## 2 Systemkonzept und Anwendungsgebiete

### 2.1 Systemkonzept

Das Systemkonzept, mit dem die NBP den eingangs beschriebenen Lösungsansatz umsetzen will, besteht aus vielen kleinen, autonom fahrenden Fahrzeugen [2], den sog. RailCabs (Bild 1). Diese Fahrzeuge fahren bedarfsgesteuert, also wann immer es ein Kunde wünscht, und können Personen und Güter sowohl im Nah- als auch im Fernverkehr zielrein, d.h. ohne Zwischenstopp, transportieren.

Im Gegensatz zu vielen anderen solcher Ansätze soll dabei die vorhandene Infrastruktur genutzt werden, indem die RailCabs auf dem bestehenden, weit verzweigten Schienennetz fahren.

Da ein umweltschonender und Ressourcen sparender Betrieb in der heutigen Zeit immer wichtiger wird, schließen sich die RailCabs auf Hauptstrecken automatisch zu Konvois zusammen, um so zum Einen durch das Fahren im Windschatten Energie einzusparen, zum Anderen aber auch eine hohe Transportkapazität zu erreichen.



**Bild 1 Design-Studie: Personen- und Güter-RailCab im Konvoi**

Das automatische Bilden und Auflösen von Konvois kann bei der maximalen Fahrgeschwindigkeit von 160 km/h erfolgen, da im Gegensatz zur heutigen Bahn die Richtungswahl nicht fahrwegseitig über die Stellung der schaltenden Weichen bestimmt wird, sondern fahrzeugeitig über die lenkbaren Fahrwerke der RailCabs. Die Weichen sind beim RailCab-System rein passiv, d. h. sowohl das Abbiegen als auch das Geradeausfahren ist ohne Umschaltvorgang zu jeder Zeit möglich. Das führt, ebenso wie das zielreine Fahren, zu hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten und somit zu kurzen Beförderungszeiten bei vergleichsweise mäßigen Spitzengeschwindigkeiten.

Das Ein- und Ausfädeln in einen bzw. aus einem Konvoi im Zentimeterabstand setzt unter allen Umständen einen zuverlässigen und berechenbaren Antrieb voraus. Daher erfolgt der Antrieb nicht wie bei der heutigen Bahn über den Rad-Schienekontakt, sondern über einen Linearantrieb, der zwischen den Schienen verlegt ist. Der sog. doppelt gespeiste Linearmotor kann unabhängig von Witterungseinflüssen die erforderlichen Antriebs- und Bremskräfte bereitstellen und gleichzeitig größere Steigungen überwinden. Darüber hinaus erlaubt dieses Motorkonzept eine berührungslose Energieübertragung ins Bordnetz der Fahrzeuge, wodurch auf eine gesonderte Energiezufuhr über Oberleitungen oder Stromschienen verzichtet werden kann.

Um trotz der vergleichsweise kompakten Fahrzeuglänge von ca. 8 m ein Höchstmaß an Fahrkomfort sicherzustellen, sind die RailCabs mit modernster Fahrwerkstechnologie ausgestattet. Anstelle schwerer Drehgestelle kommen pro Fahrzeug zwei Einzelachs-

fahrwerke in Verbindung mit einer aktiven Feder-/Neigetechnik zum Einsatz.

Das Interieur der RailCabs ist multifunktional konzipiert: Es gibt Büro- und Komfortausstattungen für den Individualverkehr sowie Großraumfahrzeuge für die Anforderungen des öffentlichen Personennahverkehrs. Die gesamte Technik ist in die Bodengruppe integriert, auf der Fracht- oder Personenbeförderungsmodule aufgesetzt werden. Das führt zu hoch standardisierten Fahrzeugen und zu einer kostengünstigen Fertigung der RailCabs.

Um dieses gänzlich neue Schienenverkehrssystem praktisch erproben zu können, wurde im Jahr 2003 an der Universität Paderborn eine Versuchsanlage im verkleinerten Maßstab 1:2,5 in Betrieb genommen (Bild 2). Die Teststrecke ist 530 m lang, weist einen Abschnitt mit 5,3 % Steigung auf und besitzt eine passive Weiche, so dass Strategien zur Bildung und Auflösung von Konvois eingehend untersucht und erprobt werden können. Mittlerweile können zwei RailCabs simultan auf der Versuchsanlage betrieben werden und stellen die technische Machbarkeit des Gesamtkonzeptes eindrucksvoll unter Beweis.



**Bild 2 RailCab-Versuchsanlage in Paderborn**

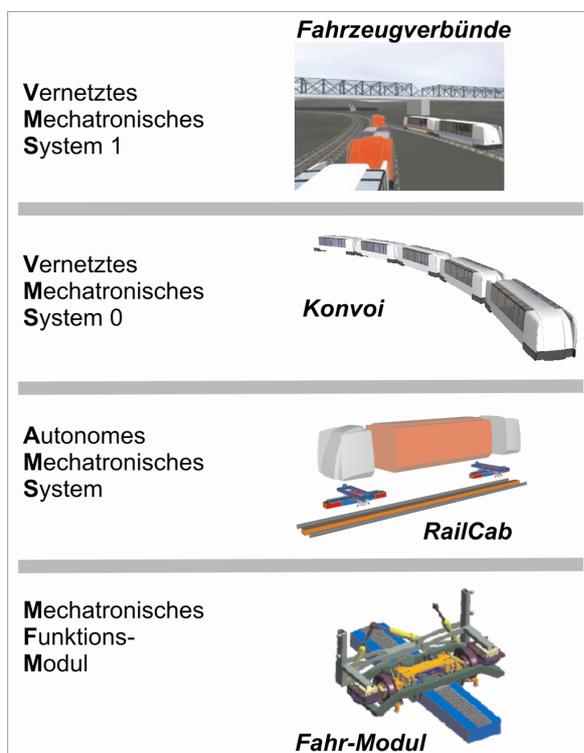
Das Gesamtsystem RailCab mit seinen vielen, rein informationstechnisch gekoppelten und vernetzten Fahrzeugen als auch jedes einzelne Fahrzeug bilden ein äußerst komplexes mechatronisches System, welches mit seiner Struktur und den einzelnen Funktionsgruppen und -modulen im Folgenden kurz beschrieben werden soll.

## 2.2 Systemstruktur

Zur Entwicklung eines hoch komplexen mechatronischen Systems, wie es das innovative Schienenverkehrssystem RailCab darstellt, ist eine systematische Strukturierung von Beginn an zwingend erforderlich. In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2206 [3] wurde für das Gesamtsystem eine modular hierarchische Struktur erarbeitet, durch deren Anwendung die Systemkomplexität beim Entwurfsprozess reduziert wer-

den kann und somit eine Auslegung des Gesamtsystems überhaupt erst möglich wird.

Die einzelnen Hierarchiestufen des RailCab-Systems sind in Bild 3 abgebildet. Darin stellt jedes einzelne RailCab-Fahrzeug ein Autonomes Mechatronisches System (AMS) dar, das wiederum aus Mechatronischen Funktionsgruppen (MFG) und Mechatronischen Funktionsmodulen (MFM) besteht [4], [5]. Das AMS RailCab-Fahrzeug stellt für sich ein abgeschlossenes System mit klar definierten Schnittstellen dar, über die es mit der Umwelt in Wechselwirkung steht. Schließen sich mehrere Fahrzeuge zu einem Konvoi zusammen, so bilden diese ein Vernetztes Mechatronisches System (VMS 0), das wiederum Teil eines überlagerten VMS sein kann, so zum Beispiel eines Streckenabschnittes VMS 1, der aus mehreren Gleisabschnitten und Fahrzeugverbänden besteht.



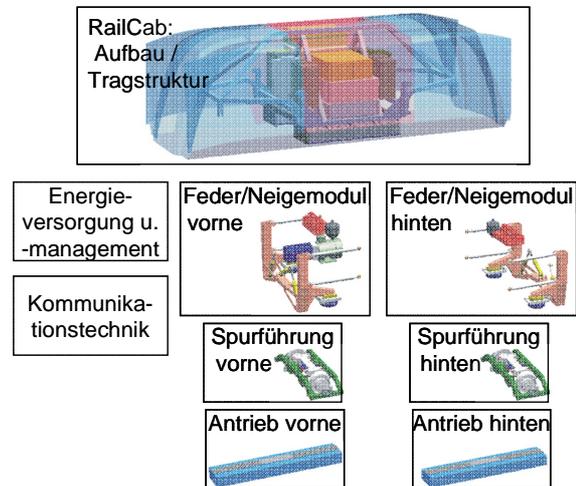
**Bild 3 Hierarchische Strukturierung des Gesamtsystems nach VDI 2206**

Die Fahrzeuge selbst besitzen ebenfalls eine modular hierarchische Struktur, was für einen beherrschbaren Entwurfsprozess auf Fahrzeugebene unerlässlich ist. Für den Entwurf der Regelung und Informationsverarbeitung ist eine funktionsorientierte Strukturierung, wie sie in Bild 4 dargestellt ist, besonders zweckmäßig.

Dabei werden die Komponenten nicht nach ihrer topologischen Anordnung zusammengefasst, sondern nach funktionalen Gesichtspunkten. Die paarweise, an jeder Achse vorhandenen Funktionsmodule bilden zusammen wiederum ein Funktionsmodul, so dass sich für

ein RailCab die folgenden Hauptfunktionsmodule ergeben:

- Antriebs- und Bremsmodul
- Spurführungs- und Lenkmodul
- Feder-/Neigemodul
- Energieversorgungs- und -managementmodul



**Bild 4 Hauptfunktionsmodule eines RailCabs**

## 2.3 Anwendungsgebiete

Bis heute wurde die technische Machbarkeit aller Systemkomponenten unter realitätsnahen Bedingungen auf der Versuchsstrecke unter Beweis gestellt. Es gilt nun, in Vorbereitung auf eine Umsetzung im Maßstab 1:1, mögliche Anwendungsszenarien zu definieren, in denen das RailCab-System in einer Erstanwendung im vollen Maßstab erprobt werden kann.

Da das Gesamtsystem aufgrund seiner hohen Modularität und Skalierbarkeit an verschiedene Einsatzbereiche angepasst werden kann, gilt es dabei die einzelnen Module so aufeinander abzustimmen, dass es den jeweiligen Anforderungen in optimaler Weise gerecht wird.

In Gesprächen mit Vertretern aus Industrie und Transportwesen, insbesondere aber auch auf der RailCab-Anwenderkonferenz, die im April 2007 in Paderborn stattgefunden hat, haben sich u. a. die folgenden drei Anwendungsgebiete für eine RailCab-Erstanwendung herauskristallisiert.

### Interner Hafenverkehr

In vielen See- und Binnenhäfen findet heute ein stetig wachsender Umschlag von Containern statt. Dabei besteht ein sehr hoher Bedarf an Umfuhren von Containern zwischen den verschiedenen Containerterminals eines Hafens. Gleiches gilt für den Austausch von Leercontainern. Ein fahrerloses, schienengebundenes Transportsystem wie das RailCab könnte hier enorme Vorteile gegenüber den heutigen, zum Teil sehr zeit- und personalintensiven Verfahren per Bahn oder LKW

bringen. Der Trend zur Automatisierung der Containerterminals könnte dadurch ebenfalls unterstützt und Hafenafläufe weiter optimiert werden.

### Zubringer für den Hafen-Hinterlandhub

Durch das hohe und weiter steigende Containeraufkommen besteht in Häfen derzeit ein großes Kapazitätsproblem. Containerlager werden im eigentlichen Hafengebiet aufgrund der hohen Grundstückspreise eher selten erweitert oder neu errichtet, so dass es zu zahlreichen Umfuhren bzw. Umlagerungen von Containern zwischen den einzelnen Hafenterminals kommt, bevor der Container den Hafen wieder verlässt. Mit RailCab könnten die Container direkt nach der Schiffsentladung automatisiert in ein Hinterlandhub transportiert werden, wo sie bis zum Weitertransport kostengünstiger gelagert und konsolidiert werden könnten.

Für diese beiden Anwendungsfälle müsste das RailCab-System gegenüber dem in Kap. 2.1 beschriebenen Systemkonzept derart modifiziert werden, als dass insbesondere die Abmaße und Ladekapazität der Fahrzeuge eine Aufnahme von 20 und 40-Fuss-Containern mit einem Gesamtgewicht von ca. 30 t ermöglichen. Erste Untersuchungen haben ergeben, dass eine RailCab-Schwerlastvariante mit bspw. vier Fahrwerkachsen diesen Anforderungen gerecht wird. Weitere Untersuchungen insbesondere bzgl. der erforderlichen Antriebskräfte stehen noch aus.

### Zubringer für den Flugverkehr

Heutzutage muss die Luftfracht auf Flughäfen in der Regel lange Strecken zwischen Frachtzentrum und Flugzeug zurücklegen. Dies geschieht fast ausschließlich über die Straße bzw. das Rollfeld mit manuell bedienten Fahrzeugen. Durch den Einsatz von RailCab könnte es auch in diesem Bereich zu Effizienzsteigerungen kommen, in dem die Luftfrachtbehälter automatisiert zwischen dem Frachtzentrum und dem Rollfeld transportiert werden. Des Weiteren wäre auch ein Personentransport auf dem Flughafen mit RailCab vorstellbar, insbesondere dann, wenn die Distanzen zwischen den Personenterminals und der Parkposition der Flugzeuge auf dem Rollfeld größer werden, z. B. durch Flughafenerweiterungen.

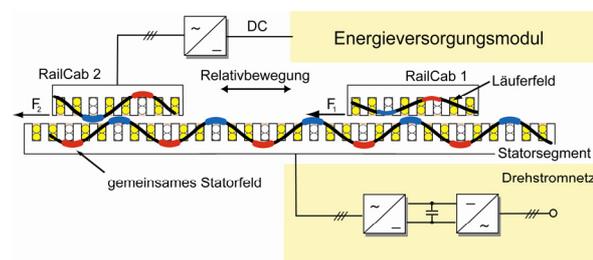
In diesem Anwendungsfall könnte das eingangs beschriebene Systemkonzept ohne größere Anpassungen direkt umgesetzt werden. Personen könnten wegen der aktiv gefederten Fahrzeuge und nicht zuletzt aufgrund der höheren Steigfähigkeit der RailCabs durch den Linearantrieb sehr komfortabel direkt an die Eingangstüren der Flugzeuge befördert werden. Gleichzeitig könnten die Güter-RailCabs Gepäck und Luftfrachtbehälter an die Laderäume der Flugzeuge transportieren.

Insgesamt gesehen können die Anwendungen auf den abgegrenzten Gebieten eines Hafens oder Flughafens

dazu dienen, die Weiterentwicklung des RailCab-Systems für den Einsatz auf der freien Strecke voranzutreiben, ohne sofort den Betriebsvorschriften für Schienenbahnen in voller Gänze zu genügen. Bei einer späteren Integration in ein bestehendes Bahnsystem sind dann in einem zweiten Schritt Maßnahmen zu entwickeln, die einen mindestens ebenso sicheren Betrieb gewährleisten wie es derzeit vorgeschrieben wird.

## 3 Antriebskonzept

Das Antreiben und regenerative Bremsen der Fahrzeuge erfolgt über einen doppelt gespeisten Asynchronlinearmotor (Bild 5), dessen Stator zwischen den Schienen im Gleisbett verlegt ist. Der ebenfalls aktiv gespeiste Sekundärteil ist unterhalb des Fahrzeugs angebracht. Während der Stator über Umrichter aus dem öffentlichen Drehstromnetz gespeist wird, erfolgt die Versorgung des Läufers durch einen an Bord befindlichen Energiespeicher. Da der Läuferstrom hinsichtlich Amplitude, Frequenz und Phase separat auf jedem Fahrzeug einstellbar ist, sind Relativbewegungen zwischen Fahrzeugen auch dann möglich, wenn sie sich über einem gemeinsamen Statorfeld bewegen. Auf diese Weise können sich die Fahrzeuge auch während der Fahrt zu Konvois zusammenschließen [6].



**Bild 5 Prinzipbild Linearantrieb**

Da der Linearantrieb nicht auf den Kraftschluss des Rad-Schiene-Kontakts angewiesen ist, können auch Streckenabschnitte mit größerer Steigung befahren werden. Zur Demonstration der Steigfähigkeit wurden an der Versuchsanlage Abschnitte mit bis zu 5,3 % Steigung realisiert. Somit können Neubaustrecken der Landschaftstopologie besser angepasst werden. Die fahrwegseitige Motorauslegung kann in gewissen Grenzen variiert werden, so dass der Antrieb hinsichtlich des jeweiligen Kraftbedarfs an den Streckenverlauf angepasst werden kann, wodurch sich wiederum die streckenseitigen Installationskosten reduzieren.

Da die Antriebskraft zudem unabhängig von äußeren Einflüssen (z. B. Witterungsverhältnissen) bereitgestellt werden kann, können die Grenzen möglicher Fahrmanöver sehr genau prognostiziert werden, so dass dieses Motorkonzept hinsichtlich autonomer Kolonnenfahrten weitere Vorteile aufweist [7].

Zudem erlaubt der doppelt gespeiste Asynchronlinearmotor während der Fahrt im unter- oder übersynchronen Betrieb auch die berührungslose Energieübertragung in das Bordnetz der Fahrzeuge. Auf eine gesonderte Energiezufuhr über Stromschienen oder Oberleitungen kann damit gänzlich verzichtet werden [8]. Da die übertragbare Energie vom jeweiligen Arbeitspunkt des Linearmotors abhängig ist und nicht in jedem Arbeitspunkt genügend Energie übertragen werden kann, befindet sich an Bord jedes Fahrzeugs ein Energieversorgungsmodul, bestehend aus einem hybriden Energiespeicher (Batterien und Superkondensatoren) und einem übergeordneten Energiemanagement, das entsprechend der Ladegrade der Speicher die Energieflüsse steuert. Bei der Einstellung des Arbeitspunktes erhält dann die höher priorisierte Antriebskraft Vorrang vor der angeforderten Energieübertragung [9].

Der streckenseitige Aufwand für den aktiv gespeisten Linearmotor ist verhältnismäßig hoch und rentiert sich nur für viel befahrene Strecken. Nebenstrecken können stattdessen mit passiven Reaktionsschienen ausgestattet werden. Allerdings muss der fahrzeugseitige Motorteil dann komplett aus dem Energiespeicher oder aber über eine separate Energiezufuhr versorgt werden.

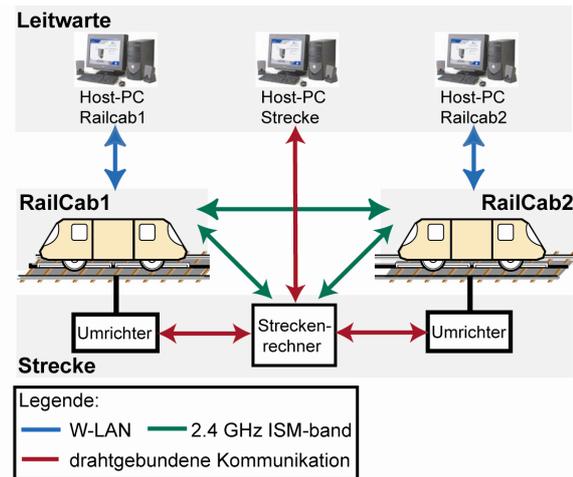
Der auf der Versuchsanlage eingesetzte doppelt gespeiste Asynchronlinearmotor liefert über den gesamten Einsatzbereich eine konstante Maximalkraft von ca. 1200 N, so dass auf ebenen Streckenabschnitten Beschleunigungen und Verzögerungen mit ca.  $0,8 \text{ m/s}^2$  möglich sind. Zudem ist eine berührungslose Leistungsübertragung von bis zu 4 kW ins Bordnetz der Fahrzeuge möglich.

## 4 Autonomer Fahrbetrieb und Konvoi

Die RailCabs bewegen sich führerlos im Streckennetz. Da die Betriebsleittechnik stark dezentral ausgeführt ist, fallen unter die Aufgaben des autonomen Fahrens die selbständige Planung und Durchführung der Fahrt. Die Sollwertvorgaben müssen dementsprechend an Bord der Fahrzeuge berechnet werden. Sofern die Möglichkeit besteht, sollen sich die kleinen Einzelfahrzeuge zu Konvois zusammenschließen und berührungslos mit geringem Abstand hintereinander herfahren, um den Energieverbrauch zu senken und den Verkehrsdurchsatz zu erhöhen.

### 4.1 Betriebsleittechnik auf der Versuchsanlage

Die Betriebsleittechnik der Versuchsanlage ist in Bild 6 dargestellt.



**Bild 6 Betriebsleittechnik**

Die Überwachung und Steuerung der Versuchsanlage erfolgt über eine Leitwarte. Von dort aus erhalten die autonom betriebenen RailCabs per Funk ihr Fahrziel. Sämtliche Regelungen und Sollwertvorgaben erfolgen dann an Bord der Fahrzeuge.

Zwischen jedem Fahrzeug und der Strecke besteht eine direkte Funkverbindung. Über diesen Kommunikationsweg werden die auf den Fahrzeugen berechneten Sollvorgaben für den Primärteil des Motors an den Streckenrechner und in umgekehrter Richtung eine Information über den Status der Funkverbindung und das Streckennetz übertragen. Um den Energiebedarf möglichst gering zu halten, werden nur die jeweils benötigten Streckenabschnitte aktiviert. Daher wird an die Strecke die aktuelle Fahrzeugposition übertragen. Folglich muss insbesondere für den Antrieb die Fahrzeugposition sehr exakt erfasst werden. Dies geschieht mittels Inkrementalencodern, die in allen vier Radnaben angebracht sind. Da diese Messung z.B. aufgrund von Spurkranzanläufen fehlerbehaftet sein kann, wird die genaue Position in kurzen Abständen durch fest angebrachte und exakt vermessene Referenzmarken neu kalibriert, so dass die Genauigkeit der Fahrzeugposition stets im Bereich weniger Zentimeter liegt. Die Position wird zusammen mit den Referenzgrößen des Stators (Stromamplitude und Stromfrequenz) per Funk an die streckenseitige Informationsverarbeitung gesendet. Die Zykluszeit für die bidirektionale Datenübertragung beträgt 20 ms [10].

Die Kommunikation zwischen Streckenrechner und den entlang der Strecke angeordneten Stromrichtern geschieht drahtgebunden über einen CANopen-Bus. Anhand der empfangenen Fahrzeugposition werden die einzuschaltenden Stromrichter bestimmt. Diese erhalten dann die Sollwerte für den Statorstrom. Nachdem das Fahrzeug einen Streckenabschnitt passiert hat, wird ein Abschaltbefehl an den jeweiligen Stromrichter gesendet.

Befinden sich Fahrzeuge in direkter Nähe zueinander, kommunizieren diese ebenfalls untereinander. Dabei werden einerseits gegenseitig Position, Geschwindig-

keit und Fahrzeugstatus ausgetauscht und andererseits findet über diesen Kommunikationsweg die Verabredung von gemeinsamen Fahrmanövern (z. B. Konvoibildung) statt [11]. Ebenso erfolgt eine Absprache für den Arbeitspunkt des primärseitigen Motorteils, wenn zwei Fahrzeuge gemeinsam den gleichen Streckenabschnitt befahren. Der Datenaustausch zwischen zwei Fahrzeugen benötigt 20 ms.

## 4.2 Sicherheitskonzepte

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Fahrsicherheit ist ein umfangreiches Sicherheits- und Überwachungskonzept erforderlich. Sämtliche für die Fahrsicherheit relevanten Komponenten und Funktionen müssen redundant ausgeführt sein.

Aus der zuvor beschriebenen Leittechnik leiten sich direkt zwei Ebenen des Sicherheitskonzeptes ab. Eine Ebene der Sicherheitsüberwachung erfolgt zentral für alle Fahrzeuge durch den Streckenrechner. Da der Streckenrechner zur Aktivierung der Streckenabschnitte die genaue Position jedes Fahrzeugs zwingend benötigt und sich aus dieser Information auch Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit ermitteln lassen, können alle auf der Strecke befindlichen Fahrzeuge präzise geortet und die Gesamtsituation analysiert werden. Über die Funkverbindung lässt sich dann gegebenenfalls der Nothalt eines Fahrzeugs herbeiführen. Eine Notbremsung erfolgt automatisch einerseits dann, wenn die Funkverbindung über einen bestimmten Zeitraum zusammenbricht, oder wenn eine kritische Fahrsituation erkannt wird.

Eine zweite Sicherheitsebene ist gänzlich dezentral organisiert und befindet sich auf den einzelnen Fahrzeugen. Einerseits wird die Funktionsfähigkeit jedes Funktionsmoduls kontinuierlich abgefragt. Andererseits werden im Falle einer Konvoifahrt die eigenen Istwerte mit denen der beteiligten Fahrzeuge verglichen. Überprüft werden dabei die für den jeweiligen Streckenabschnitt und den aktuellen Betriebszustand des Fahrzeugs zulässige Höchstgeschwindigkeit sowie im Konvoibetrieb der aktuelle Fahrzeugabstand und die Differenzgeschwindigkeit der beteiligten Fahrzeuge.

Ein weiteres Sicherungssystem basiert auf den Messwerten einer Umfeld erkennenden Sensorik. Dazu werden für den Nahbereich (Fahrzeugabstand geringer 5 m) Ultraschallsensoren eingesetzt. Für größere Entfernungen sind die Fahrzeuge mit Laserdistanzmessern ausgestattet. Mit diesen Vorrichtungen kann der Abstand zu benachbarten Fahrzeugen sowie der Gleisraum überwacht werden.

Das Sicherheitskonzept eines RailCabs ist in Bild 7 dargestellt.

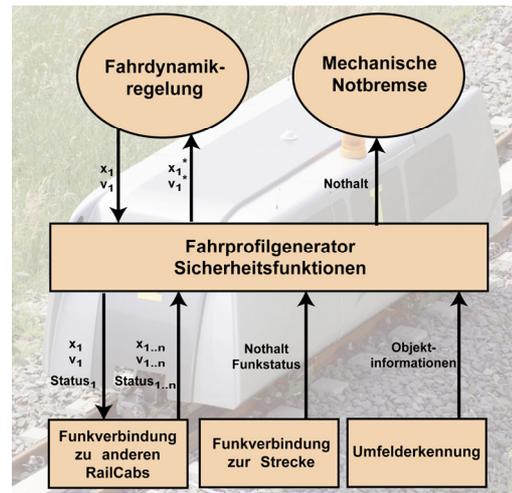


Bild 7 Sicherheitskonzept eines Fahrzeugs

## 4.3 Fahrprofilvorgabe

Die Koordination der Fahrbewegung bei spurgeführten Fahrzeugen erfordert lediglich die Sollwertvorgabe und Regelung der Längsdynamik. Jedoch müssen die Fahrprofile der Fahrzeuge kontinuierlich an das sich dynamisch ändernde Verkehrsumfeld angepasst werden. Dazu werden die Sollwerte für das Fahrprofil direkt an Bord jedes Fahrzeugs ermittelt.

Die eingesetzte Kaskadenregelung sieht in der äußersten Regelschleife eine Positionsregelung vor. Dieser unterlagert ist eine Geschwindigkeitsregelung, die eine Sollschiebkraft für die unterlagerte Antriebsregelung generiert. Daraus werden entsprechend der eingesetzten Betriebsstrategie die zur Kraftbildung benötigten Motorströme des Primär- und Sekundärteils berechnet (vgl. Kap. 3). Die Sollvorgaben werden dann an die Läuferstromregelung weitergegeben bzw. an die Strecke übertragen.

Um ein hohes Maß an Fahrkomfort zu gewährleisten, werden beschleunigungs- und ruckbegrenzte Fahrprofile generiert [12]. Da die Fahrzeuge individuell und nicht nach Fahrplan verkehren sollen, werden Fahrprofile berechnet, aus denen sich möglichst kurze Fahrzeiten ergeben. Denkbar sind aber auch Fahrprofile, die beispielsweise hinsichtlich der gewünschten Energieübertragung ins Bordnetz oder des Energiebedarfs optimiert sind. Diesbezügliche Arbeiten werden aktuell im SFB 614 verfolgt [13].

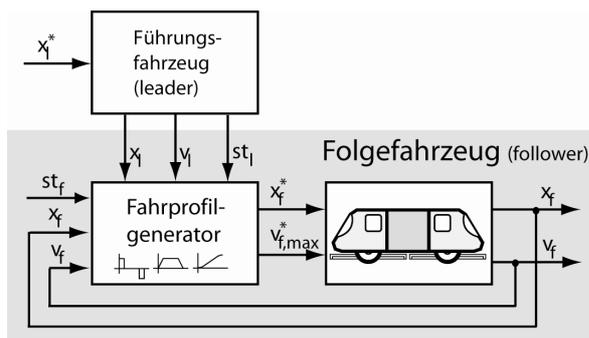
Bei der Berechnung des Fahrprofils wird der vorausliegende Streckenverlauf, der auf dem Fahrzeugrechner hinreichend genau hinterlegt ist, analysiert. Da zudem die Fahrzeugposition exakt bekannt ist und die Traktion des Linearmotors unabhängig von äußeren Einflüssen ist, kann die zur Verfügung stehende Beschleunigungskraft ermittelt werden, wodurch sich wiederum die Längen von Beschleunigungs- bzw. Bremswegen sehr genau prognostizieren lassen. Diese

Daten dienen wiederum als Basis für die Positionsregelung insbesondere bei Konvoifahrten.

#### 4.4 Konvoibetrieb

Um den Streckendurchsatz zu erhöhen und den Energiebedarf durch Fahren im Windschatten zu minimieren, können einzelne Fahrzeuge sich während der Fahrt dynamisch zu berührungslosen Konvois zusammenschließen. Mittels der aktiven Lenkung können an passiven Weichen einzelne Fahrzeuge selbst bei geringen Fahrzeugabständen aus dem Konvoi ausscheren [14].

Die hier betrachtete Kolonnenregelung erfolgt nach dem Vehicle-Follower-Prinzip. Im Gegensatz zum Vehicle-Point-Prinzip werden den Fahrzeugen keine Soll-Positionen vorgegeben, sondern jedes Fahrzeug regelt seine Position relativ zu anderen Kolonnenfahrzeugen [15]. Als Grundlage für die autonome Konvoi-regelung dient hier die Kommunikation relevanter Daten wie Position, Geschwindigkeit und Systemzustand innerhalb einer Fahrzeugkolonne [7], (Bild 8).



**Bild 8** Fahrprofilergzeugung des Folgefahrzeugs

Die Messwerte der Umfelderkennung dienen einerseits zur Verifikation der Datenkommunikation zwischen den Fahrzeugen, andererseits ist im Bereich sehr geringer Fahrzeugsabstände ( $< 1$  m) die Genauigkeit der Positionserfassung der Fahrzeuge nicht mehr ausreichend, so dass in diesen Fällen den Messwerten die höhere Priorität eingeräumt wird. Der gemeinsame Einsatz von Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation und Abstandssensorik ermöglicht den Betrieb selbst bei geringen Fahrzeugsabständen [16]. Besteht die Fahrzeugkolonne aus mehr als zwei Fahrzeugen, kann eine Kolonnenstabilität dadurch erzielt werden, dass die Geschwindigkeit des Kolonnenführungsfahrzeugs an alle beteiligten Fahrzeuge übermittelt wird. Kolonnenstabilität ist in diesem Fall selbst dann gegeben, wenn konstante Sollabstände eingeregelt werden [17]. Wird zudem noch die Beschleunigung des Führungsfahrzeugs übermittelt, kann frühzeitig auf Störungen reagiert werden [18].

Aufgabe der Konvoi-Strategie ist eine möglichst zügige Konvoibildung unter Gewährleistung der Sicherheit.

Sehr hilfreich ist hier im Gegensatz zu anderen Antriebskonzepten der eingesetzte Linearmotor, welcher sowohl eine von äußeren Einflüssen unabhängige zuverlässige Einstellung der Antriebskraft als auch eine genaue Bestimmung der Fahrzeugposition ermöglicht. Dadurch können Beschleunigungs- und Bremsmanöver relativ genau abgeschätzt werden [7]. Sicherheitsabstände, wie sie beispielsweise für eine Abstandsregelung im Automobilbereich erforderlich sind [19], können auf diese Weise stark verringert werden. Durch Übermittlung der Daten von Fahrzeugmasse und Antriebskraft können zudem auch die Beschleunigungs- und Bremswege des vorausfahrenden Fahrzeugs ermittelt werden. Daher werden vom Folgefahrzeug die Berechnungen sowohl für die eigenen Wegstrecken als auch für die des Führungsfahrzeugs unternommen.

Zu beachten sind hierbei auch die im vorherigen Abschnitt erwähnten Fahrprofile, die hinsichtlich eines hohen Fahrkomforts beschleunigungs- und ruckbegrenzt sind. Diese Beschränkungen, die im normalen Betrieb innerhalb der technischen Grenzen des Antriebssystems liegen, sind bei der Reglerauslegung und der Ermittlung der Strategien für Konvoifahrten zu berücksichtigen. Die daraus resultierende Stellreserve kann gegebenenfalls als Sicherheitsreserve genutzt werden.

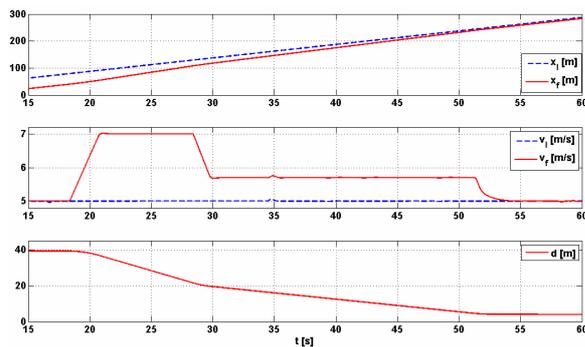
Die Regelstrategie soll es erlauben, Abstände von wenigen Metern oder sogar unter einem Meter einzuregeln und Zusammenstöße zu vermeiden. Wird ein sehr enger Abstand zwischen den Fahrzeugen eingehalten, so könnte sich selbst bei einem Ausfall der Abstandsregelung bis zu einer Berührung der Fahrzeuge nur eine mäßige Differenzgeschwindigkeit entwickeln, die über Puffer abgefangen werden kann. Bei der vorliegenden Anwendung wird dafür eine maximale Aufprallgeschwindigkeit von 1 m/s angenommen.

#### 4.5 Ergebnisse

Der Konvoibetrieb ist bisher an einem HiL-Prüfstand (Hardware in the Loop), an dem die Bewegung der Fahrzeuge simuliert wird, aber die Kommunikationsnetzwerke real vorhanden und örtlich verteilt sind, eingesetzt worden. Durch diese Vorgehensweise lassen sich insbesondere die Auswirkungen von Latenzzeiten bei der Datenübertragung sowie von Kommunikationsausfällen auf das Fahrzeugverhalten zuverlässig erproben und als besonders kritisch anzusehende Fahrmanöver untersuchen.

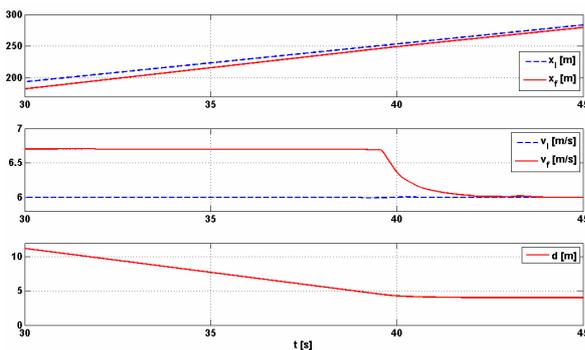
In Bild 9 ist der Prozess der Konvoibildung dargestellt. Das Folgefahrzeug (follower) fährt zunächst mit der Geschwindigkeit  $v_f = 7$  m/s heran. Mit der Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs (leader)  $v_l = 5$  m/s ergibt sich eine Differenzgeschwindigkeit von 2 m/s. Rechtzeitig wird die Differenzgeschwindigkeit

weiter reduziert und der Sollabstand  $d^* = 4$  m eingeregelt.



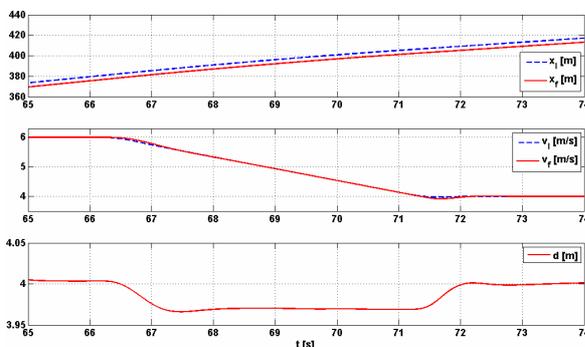
**Bild 9 Aufschließen eines Fahrzeugs**

Das Einregeln des Sollabstands ist in Bild 10 zu sehen. Das Folgefahrzeug verringert bei mäßiger Differenzgeschwindigkeit (0,7 m/s) den Abstand  $d$  zum Führungsfahrzeug. Ohne Überschwingen wird der Sollabstand erreicht. Da die Fahrzeugpositionen in einem Koordinatensystem abgebildet und die Positionen jeweils auf die Fahrzeugmitte bezogen werden, beträgt bei einer Fahrzeuglänge von 3,5 m dementsprechend der Abstand 0,5 m.



**Bild 10 Folgefahrt**

Das Systemverhalten bei einer Bremsung des Führungsfahrzeugs ist in Bild 11 dargestellt. Das Führungsfahrzeug bremst von 6 m/s auf 4 m/s ab. Da für das Folgefahrzeug eine höhere Bremsverzögerung zugelassen wird, weicht bei diesem Fahrmanöver der Abstand maximal um 4 cm vom Sollwert ab.



**Bild 11 Systemverhalten bei einem Bremsmanöver**

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Umsetzung des vorgestellten RailCab-Konzepts wird an der Versuchsanlage in Paderborn gezeigt. Die RailCabs bestehen aus hierarchisch strukturierten Funktionsmodulen und stellen in ihrer Gesamtheit ein äußerst komplexes mechatronisches System dar. Mit den zwei existierenden Versuchsfahrzeugen und den installierten Kommunikationsnetzwerken ist ein vollautomatischer Fahrbetrieb zuverlässig möglich, so dass die technische Machbarkeit des Gesamtsystems eindrucksvoll demonstriert werden kann.

Durch den Einsatz des doppelt gespeisten Linearmotors und der installierten Betriebsleittechnik können sich die Fahrzeuge während der Fahrt dynamisch zu berührungslosen Konvois zusammenschließen. Erforderliche Sicherheitsabstände lassen sich somit erheblich reduzieren, wodurch Fahrzeugabstände von unter einem Meter realisiert werden können.

Die gegenwärtigen Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die weitere Erprobung des Konvoibetriebs und der damit einhergehenden Reduzierung des Fahrzeugabstandes. Fokussiert wird vor allem die weitere Analyse und Erprobung sicherer Konvoimanöver im Störfall.

## 6 Danksagung

Das Projekt Neue Bahntechnik Paderborn wird gefördert vom Land Nordrhein-Westfalen, von der Universität Paderborn und von der Stadt Paderborn.

Folgende Lehrstühle sind am Projekt beteiligt:  
 Regelungstechnik und Mechatronik (Prof. Trächtler)  
 Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik (Prof. Böcker)  
 Mechatronik und Dynamik (Prof. Wallaschek)  
 Rechnerintegrierte Produktion (Prof. Gausemeier)  
 Wirtschaftsinformatik / CIM (Prof. Dangelmaier)  
 Angewandte Mechanik (Prof. Richard)  
 Softwaretechnik (Prof. Schäfer)

## 7 Literatur

- [1] <http://www.railcab.de>
- [2] Lückel, J.: Systemkonzept Neue Bahntechnik Paderborn, Das 4. Internationale HNI-Symposium, 2000, Paderborn.
- [3] VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, Berlin, Beuth 2003.
- [4] Lückel, J.; Grotstollen, H.; Jäker, K.-P.; Henke, M.; Liu, X: Mechatronic Design of a Modular Railway Carriage, IEEE/ASME International

- Conference on Advanced Intelligent Mechatronics 1999, AIM 1999, Atlanta, GA, USA, S. 1020-1025.
- [5] Trächtler, A.: RailCab – mit innovativer Mechatronik zum Schienenverkehrssystem der Zukunft, VDE Kongress 2006, Fachtagungsberichte der ETG, GMA, DGBMT, Band 2, 2006, Aachen.
- [6] Henke, M.; Grotstollen, H.: Control of the NBP linear drive system, Control Engineering Practice CEP 10, 2002, pp. 1029-1035.
- [7] Henke, C.; Fröhleke, N.; Böcker, J.: Advanced Convoy Control Strategy for Autonomously Driven Railway Vehicles. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems, Toronto, Kanada, 2006.
- [8] Pottharst, A.; Henke, M.; Grotstollen, H.: Power Supply Concept of the Longstator Linear Motor of the NBP-Test Track. EPE-PEMC 2002, Dubrovnik & Cavtat, 2002.
- [9] Pottharst, A.; Baptist, K.; Schütze, O.; Böcker, J.; Fröhleke, N.; Dellnitz, M.: Operating Point Assignment of a Linear Motor Driven Railway Vehicle Using Multiobjective Optimization Methods. EPE-PEMC 2004, Riga.
- [10] Pottharst, A.; Schulz, B.; Böcker, J.: Kommunikationssystem einer Anlage mit doppelt gespeistem Linearmotor. SPS/IPC/DRIVES 2004, September 2004, Nürnberg, Deutschland.
- [11] Henke, C.; Vöcking, H.; Böcker, J.; Fröhleke, N.; Trächtler, A.: Convoy Operation of Linear Motor Driven Railway Vehicles. LDIA 2005, The Fifth International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, September 2005, Kobe - Awaji, Japan.
- [12] Wende, D.: Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Teubner, 2003, Wiesbaden.
- [13] Internetseite des Sonderforschungsbereichs 614: <http://sfb614.de>
- [14] Etingshausen, C., Hestermeyer, T., Otto, S.: Aktive Spurführung und Lenkung von Schienenfahrzeugen, 6. Magdeburger Maschinenbautage 2003, Magdeburg, 2003.
- [15] Fenton, R. E.; Mayhan, R. J.: Automated Highway Studies at the Ohio State University – An Overview, IEEE Transactions On Vehicular Technology, Vol. 40, No. 1, 1991, S.100-113.
- [16] Gehring, O.: Automatische Längs- und Querregelung einer Lastwagenkolonne, Dissertation, Institut für Mechatronik, Universität Stuttgart, 2000.
- [17] Sladover, S. E.: Longitudinal Control of Automated Guidway Transit Vehicles Within Platoons, Transactions on the ASME Vol. 100, 1978, S.302-310.
- [18] Sheikholeslam, S.; Desoer, C. A.: A System Level Study of the Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles, Transactions of The ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 114, 1992, S.286-292.
- [19] Mayr, R.: Regelungsstrategien für die autonome Fahrzeugführung, Springer Verlag, Berlin, 2001.