

# **Betriebs- und Regelstrategien für den autonomen Fahrbetrieb von Schienenfahrzeugen mit Linearantrieb**

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik  
der Universität Paderborn

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christian Henke

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker  
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler

Tag der mündlichen Prüfung: 30.01.2013

Paderborn 2013

Diss. EIM-E/287



# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik der Universität Paderborn. Wesentliche Inhalte dieser Arbeit sind im Rahmen des Projekts „Neue Bahntechnik Paderborn – RailCab“ sowie innerhalb des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker für die Betreuung dieser Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Für die gute Zusammenarbeit und das hervorragende Arbeitsklima am Fachgebiet LEA möchte ich mich bei allen ehemaligen Kollegen und vor allem bei Herrn Dr.-Ing. Norbert Fröhleke bedanken. Bedanken möchte ich mich beim RailCab-Projektteam, besonders bei Herrn Dipl.-Math. Carsten Rustemeier, Herrn Dipl.-Ing. Tobias Schneider, Herrn M.Sc. Jens Geisler und Herrn Dipl.-Ing. Mikhail Borzykh, die mir immer wieder durch fachliche Diskussionen bei der Entstehung dieser Arbeit geholfen haben. Ferner gilt ein herzliches Dankeschön allen studentischen Hilfskräften bzw. Studien- und Diplomarbeitern von denen ich Herrn Dipl.-Ing. Nikolaj Gorte und Herrn Dipl.-Ing. Oleg Buchholz besonders erwähnen möchte.

Meinem Bruder Andreas Henke gilt ein besonderer Dank für die sorgfältige Durchsicht des Manuskriptes und vor allem auch für die Unterstützung in all den Lebensjahren.

Danken möchte ich meiner Familie, die während der Entstehung dieser Arbeit immer Verständnis gezeigt hat. Speziell in der Endphase haben mir meine Frau Christiane und mein Sohn Alexander durch eine wunderbare Familienatmosphäre viel Motivation gegeben.

Christian Henke

Paderborn, im September 2012



# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen .....	v
1. Einleitung .....	1
2. Strukturierung und Systembeschreibung .....	9
2.1 Funktionsbeschreibung der autonomen Konvoifahrten.....	9
2.2 Strukturierungsmethoden und Systementwurf .....	11
2.2.1 Modularisierung und Hierarchisierung am Beispiel RailCab.....	11
2.2.2 Struktureller Aufbau verteilter Systeme .....	15
2.2.3 Operator-Controller-Modul (OCM) RailCab.....	16
2.2.4 Weitere Entwicklungsmethodiken.....	18
2.3 RailCab – Antriebstechnik.....	20
2.3.1 Schubkraftbildung des doppelt gespeisten Linearmotors .....	21
2.3.2 Leistungsübertragung für den doppelt gespeisten Linearmotor .....	22
2.3.3 Regelungsstruktur für den doppelt gespeisten Linearmotor .....	24
2.4 Modellierung von Fahrzeug und Umfeld .....	25
2.5 Vergleich mit dem Stand der Technik.....	28
2.5.1 Transportsysteme und Technologien .....	29
2.5.2 Elektrische Antriebe und Energieversorgung.....	33
2.5.3 Verteilte autonome Systeme .....	34
2.5.4 Alleinstellungsmerkmale des Schienenverkehrssystems RailCab.....	36
3. Betriebsleit- und Sicherungstechnik .....	39
3.1 Betriebsleittechnik für den autonomen Fahrbetrieb .....	39
3.1.1 Implementierung an der Versuchsanlage.....	41

---

3.1.2	Fahrzeugseitige Informationsverarbeitung.....	43
3.1.3	Streckenseitige Informationsverarbeitung.....	45
3.2	Datenaustausch zwischen verteilten Systemen.....	45
3.2.1	Beschreibung der Kommunikationskanäle.....	45
3.2.2	Kommunikation auf Controller-Ebene.....	48
3.2.3	Kommunikation auf Ebene des reflektorischen Operators.....	55
3.3	Identifikation der Fahrzeugposition.....	64
3.3.1	Messung mittels Inkrementalgebern und Referenzmarken.....	64
3.3.2	GPS Messung.....	65
3.3.3	Bestimmung der Absolutposition.....	69
3.4	Sicherungstechnik.....	70
3.4.1	Installierte Sicherungseinrichtungen.....	70
3.4.2	Fahrzeugseitige Sicherungstechnik.....	73
3.4.3	Fahrwegseitige Sicherungstechnik.....	76
4.	Arbeitspunktsteuerung des Linearmotors im Konvoibetrieb.....	77
4.1	Arbeitspunktvorgabe im Konvoibetrieb.....	77
4.2	Heuristik zur Vergabe der Arbeitspunkte.....	85
4.3	Leistungsübertragung im Konvoibetrieb.....	89
4.3.1	Analyse der Leistungs- und Energieflüsse bei Einzelfahrten.....	90
4.3.2	Einflussanalyse der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation auf die Leistungsübertragung.....	91
4.3.3	Analyse der Betriebsarten.....	92
5.	Regelung der Fahrzeuglängsdynamik.....	99
5.1	Struktur der Längsdynamikregelung.....	99
5.1.1	Geschwindigkeitsregelung.....	100
5.1.2	Positionsregelung.....	101
5.1.3	Führungsgrößengenerator.....	102
5.2	Regelverfahren für den Konvoibetrieb.....	106

---

5.2.1	Erweiterung der Längsdynamikregelung für Konvoifahrten.....	106
5.2.2	Stabilität der Abstandsregelung.....	108
5.3	Optimale Konvoifahrten.....	112
5.3.1	Reduzierung der Aufprallstärke bei Fahrzeugkollisionen.....	112
5.3.2	Regelstrategien für autonome Konvoifahrten.....	114
5.3.3	Generierung quasi-kontinuierlicher Daten mittels modellbasierter prädiktiver Verfahren.....	116
5.4	Ergebnisse der Versuchsfahrten.....	118
6.	Funktionale Sicherheit autonomer Schienenfahrzeuge.....	123
6.1	Sicherheit in elektronisch geregelten, automatisierten Systemen.....	124
6.1.1	Funktionale Sicherheit.....	124
6.1.2	Anwendung der funktionalen Sicherheitsanalyse für die automatische Fahrzeuglängsführung.....	126
6.2	Sicherheitsanalyse.....	128
6.2.1	Gefahrenanalyse.....	128
6.2.2	Fehlerbaumanalyse.....	131
6.2.3	Zustandsbestimmung im OCM RailCab.....	131
6.2.4	Fehlerdiagnose.....	135
6.2.5	Fehlerüberwachung und Fehlerspeicherung.....	137
6.3	Fehlermanagement.....	141
6.3.1	Fehlereliminierung und Fehlerreduktion.....	141
6.3.2	Fehlerbeherrschung.....	142
6.3.3	Störfallreaktionen.....	142
7.	Zusammenfassung.....	147
	Literaturverzeichnis.....	149



# Formelzeichen und Abkürzungen

## Definition und Schreibweisen

$\underline{i}, \underline{u}$	Komplexe Größen Strom, Spannung
$i, u$	Momentanwert Strom, Spannung
$I, U$	Effektivwert Strom, Spannung
$x(t)$	zeitkontinuierliche Funktionen
$G(s)$	Übertragungsfunktion
$\hat{x}, \hat{y}$	Schätzwerte

## Formelzeichen und Symbole

$a$	Dämpfungsparameter
$a_M$	Beschleunigung bzw. Verzögerung
$a_{M,step}$	Schrittweite Beschleunigung bzw. Verzögerung
$a_{SB}$	Verzögerung Schnellbremsung
$A_O$	Oberfläche des Zuges/Fahrzeugverbands
$A_S$	Bezugsfläche (= 10 m/s <sup>2</sup> )
$A_{Fr}$	Frontquerschnittsfläche
$c_R$	Reibbeiwert
$c_W$	Luftwiderstandsbeiwert
$c_{W,Bug}$	Luftwiderstandsbeiwert Bug
$c_{W,Heck}$	Luftwiderstandsbeiwert Heck
$c_{W,FT}$	Luftwiderstandsbeiwert Fenster, Türen
$c_{W,Rad}$	Luftwiderstandsbeiwert Rad
$c_{W,Tr}$	Luftwiderstandsbeiwert Trennspace zwischen RailCabs
$d$	Abstand
$D_S$	relative Einschaltdauer Stator bezogen auf Statorabschnittslänge

---

$F_H$	Hangabtriebskraft
$F_L$	Luftwiderstandskraft
$F_M$	Mechanische Kraft
$F_R$	Reibkraft
$F_{SB}$	Kraft bei Schnellbremsung
$F_{SK}$	Kraft bei Spurkranzanlauf
$g$	Gravitationskonstante
$G$	Übertragungsfunktion
$G_F$	Übertragungsfunktion Vorfilter
$GP$	Generatorpolynom
$G_o, G_g$	Übertragungsfunktion offener, geschlossener Regelkreis
$G_R, G_S$	Übertragungsfunktion Regelstrecke, Regler
$i_L$	Läuferstrom
$i_S$	Statorstrom
$k$	Index Streckenabschnitt
$K_r$	Reglerverstärkung
$k_L$	Anzahl der Läuferelemente
$k_M$	Motorkonstante
$l_{Fzg}$	Länge Fahrzeug
$l_{Stator}$	Länge Statorsegment
$l_{Zug}$	Länge Zug
$L_h$	Hauptinduktivität
$L_L$	Läuferinduktivität
$L_S$	Statorinduktivität
$L_{L\sigma}$	Streuinduktivität Läufer
$L_{S\sigma}$	Streuinduktivität Stator
$m$	Masse

---

$m_{RC}$	Masse RailCab
$F_M$	Mechanische Kraft
$N$	Anzahl
$P_B$	Elektrische Bordnetzleistung
$P_E$	Elektrische Wirkleistung
$P_M$	Mechanische Wirkleistung
$P_L$	Wirkleistung Läufer
$P_S$	Wirkleistung Stator
$pr$	Priorität
$Q_L$	Blindleistung Läufer
$Q_S$	Blindleistung Stator
$r_M$	Ruck
$R_L$	Läuferwiderstand
$R_S$	Statorwiderstand
$s$	Schlupf
$s_b$	Bremsweg
$s_{LZB}$	Länge der Wegvorausschau bei der Linienzugbeeinflussung
$t$	Kontinuierliche Zeit
$T_A$	Abtastzeit
$T_{LM}$	Zeitkonstante Linearmotor
$T_N$	Nachstellzeit Regler
$T_{Stator,ein}$	Einschaltzeitdauer Stator
$T_{sum,SR}$	Summenzeitkonstante Stromregelkreis
$T_{timerB}$	Zeitraaster des Hardware-Interrupts auf dem PowerPC
$T_{TK}$	Latenzzeit Kommunikation Statorsollwerte
$T_{tot,SR}$	Statistische Stromrichtertotzeit
$T_{\ddot{U}}$	Überlappung Einschaltdauer Stator

---

$U_L$	Läuferspannung
$U_S$	Statorspannung
$\ddot{u}$	Übersetzungsverhältnis
$v_M$	Mechanische Geschwindigkeit
$v_W$	Windgeschwindigkeit
$W_E$	Elektrische Energie
$x_{GPS}, y_{GPS}$	x, y-GPS-Koordinate
$x_M$	Mechanische Position
$x_{St}, y_{St}$	x, y-Koordinate Versuchsstrecke
$\Delta T$	Zeitintervall
$\Delta T_a$	Zeitdauer Aufsummierung Beschleunigung
$\Delta T_{SB}$	Einschaltverzögerungszeit Schnellbremsung
$\Delta T_{USS}$	Ansprechzeit Ultraschallsensorik
$W_B$	Bordnetzenergie
$\alpha$	Neigungswinkel
$\varepsilon$	Drehwinkel
$\eta$	Wirkungsgrad
$\rho_{Luft}$	Dichte der Luft bei 20°C
$\tau_p$	Polteilung
$\psi_S$	Statorflussverkettung
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit

### Indizes

0	Startwert
d, q	Bezogen auf das d, q-Koordinatensystem
E	Elektrische Größe
i	Index Streckenabschnitt

L	Läufergröße
M	mechanische Größe
max	Maximalwert
n	Index Fahrzeug
N	Anzahl
S	Statorgröße
sum	Summe
x	Größe bezieht sich auf Lageregelkreis
v	Größe bezieht sich auf Geschwindigkeitsregelkreis
*	Sollwert

### **Abkürzungen**

AMS	Autonomes Mechatronisches System
AR	Augmented Reality
GPS	Global Positioning System
HiL	Hardware-in-the-Loop
IP	Internet Protocol
LZB	Linienzugbeeinflussung
MFG	Mechatronische Funktionsgruppe
MFM	Mechatronisches Funktionsmodul
NBP	Neue Bahntechnik Paderborn
OCM	Operator Controller Modul
RC	RailCabUDP
UDP	User Datagram Protocol
USS	Ultraschallsensorik
VMS	Vernetztes Mechatronisches System
VR	Virtual Reality
WLAN	Wireless Local Area Network



# 1. Einleitung

## Untersuchungsgegenstand

In der heutigen Zeit wächst der Wunsch nach Mobilität, Flexibilität und kurzen Reise- und Transportzeiten. Das Resultat ist ein stetiger Anstieg des Transportaufkommens und eine zunehmende Verdichtung der verfügbaren Verkehrswege [Sbd11].

Der Straßenverkehr bietet zwar ein Höchstmaß an Individualität und Flexibilität, jedoch treten vor allem in Ballungsgebieten immer häufiger Staus auf. Die Bahn stellt mit ihrem weit ausgeprägten Schienennetz prinzipiell eine Alternative dazu dar; sie ist jedoch insbesondere bei Umsteigeverbindungen mit langen Wartezeiten wenig attraktiv. Zudem wurden bereits in der Vergangenheit zahlreiche unrentable Nebenstrecken stillgelegt. Die Bahn kann lediglich auf gut ausgebauten Hauptstrecken ihre Geschwindigkeitsvorteile ausspielen [Sch05].

Im Gütertransport besitzt die Bahn prinzipiell Vorteile gegenüber dem Straßenverkehr. Aufgrund der begrenzten Transportkapazität stößt der schienengebundene Güterverkehr jedoch zunehmend an seine Grenzen. Ein flexibler und schneller Gütertransport von Kleinsendungen ist kaum realisierbar [Sch05].

Das Verkehrssystem Neuen Bahntechnik Paderborn (NBP) [NBP12] setzt die Vorteile des Individualverkehrs auf der Schiene um. An die Stelle Fahrplan getriebener Züge treten viele kleine, autonom fahrende Fahrzeuge, die sogenannten RailCabs [Lue00], die sich auf den bestehenden Schienenverkehrswegen bewegen. Die Fahrzeuge werden bedarfsorientiert auf Kundenwunsch sowohl für den Personen- als auch für den Gütertransport betrieben und verkehren zielrein, d. h. ohne Zwischenstopp, gleichermaßen im Nah- wie auch im Fernverkehr. Die RailCabs schließen sich auf Hauptstrecken automatisch zu berührungslosen Konvois zusammen, um durch das Fahren im Windschatten Energie einzusparen und gleichzeitig die Transportkapazität zu erhöhen.

Im Gegensatz zur heutigen Bahn werden streckenseitig passive Weichen ohne schaltbare Weichenzungen eingesetzt. Die Fahrzeuge werden vielmehr mit aktiv gelenkten Fahrwerken ausgestattet, wobei die Richtungswahl durch die Fahrzeuge selber festgelegt wird und damit ein automatisches Bilden und Auflösen von Konvois selbst bei der maximalen

Fahrtgeschwindigkeit möglich wird. Auf diese Weise können hohe Durchschnittsgeschwindigkeiten und somit kurze Beförderungszeiten ohne sehr hohe Spitzengeschwindigkeiten erzielt werden.

Das dynamische Zusammenfügen und Auflösen von Konvois bei minimalen Fahrzeugabständen setzt einen zuverlässigen Antrieb voraus. Daher erfolgt der Antrieb nicht wie bei der heutigen Bahn über den Rad-Schiene-Kontakt, sondern über einen Linearantrieb, dessen Primärteil entlang des Fahrweges zwischen den Schienen verlegt ist. Der sogenannte doppelt gespeiste Linearmotor kann unabhängig von der Witterung die erforderlichen Antriebs- und Bremskräfte bereitstellen und gleichzeitig größere Steigungen überwinden. Dieses Motorkonzept erlaubt zudem eine berührungslose Leistungsübertragung ins Bordnetz der Fahrzeuge. Somit kann auf eine gesonderte Energiezufuhr über Oberleitungen oder Stromschienen verzichtet werden.

Zur Untersuchung des zuvor vorgestellten neuartigen Bahntransportsystems wurde im Jahr 2003 eine Testanlage im Maßstab 1:2,5 errichtet (siehe Bild 1.1 b, vgl. [Pot06]). Mit der Anlage, die mit einem doppelt gespeisten Linearmotor ausgestattet ist und zu der zwei Versuchsfahrzeuge (siehe Bild 1.1 a) gehören, soll die technische Machbarkeit und Umsetzbarkeit der technologischen Innovationen demonstriert werden.



**Bild 1.1** a) RailCabs

b) RailCab-Versuchsanlage

## **Leistungsfähigkeit von Verkehrssystemen**

Neuartige Verkehrssysteme sollen dem Nutzer vor allem eine Steigerung des Komforts sowie eine Verringerung der Transportzeiten bieten. Neben diesen Eigenschaften muss aber auch die allgemeine Leistungsfähigkeit des Verkehrssystems beurteilt werden.

Die Leistungsfähigkeit eines Schienentransportsystems lässt sich anhand von zwei Größen abschätzen. Einerseits ist der Streckendurchsatz in Form von Fahrzeugen bzw. Personen pro Spur und Zeiteinheit und damit die Beförderungsleistung von besonderer Bedeutung. Andererseits muss auch der ökologische Nutzen des Verkehrskonzepts bewertet

werden. Folglich kann anhand einer Abschätzung von Transportkapazität und Energieaufwand ein Vergleich zur herkömmlichen Bahntechnik vorgenommen werden. Neben diesen beiden Größen sind Investitions- wie auch Betriebskosten ebenso ausschlaggebend. Auf derartige Kosten wird an dieser Stelle jedoch nicht eingegangen.

Der Konvoibetrieb mit minimalen Fahrzeugabständen bietet zwei wesentliche Vorteile gegenüber dem Betrieb von Einzelfahrzeugen. Es verringert sich einerseits der Energiebedarf, da Fahrzeuge den Windschatten des vorausfahrenden Fahrzeugs nutzen können, andererseits erhöht sich die Transportkapazität des Streckennetzes.

Der elektrische Energiebedarf  $W_E$  eines Transportmittels wird üblicherweise pro Fahrgast- bzw. Sitzplatzkilometer bei Reisegeschwindigkeit angegeben und berechnet sich maßgeblich aus der mechanischen Leistung  $P_M$ , über die Fahrwiderstandskräfte (Luftwiderstandskraft  $F_L$ , Hangabtriebskraft  $F_H$ , Rollwiderstandskraft  $F_R$  etc.) und die Geschwindigkeiten (Fahrgeschwindigkeit  $v_M$  und Windgeschwindigkeit  $v_w$ ) sowie aus der elektrischen Leistung  $P_E$ , die sich im Wesentlichen aus dem Wirkungsgrad  $\eta_E$  von Antrieb und Energieeinspeisung ergibt:

$$P_M = (F_L + F_H + F_R) \cdot v_M = P_E \cdot \eta_E \quad (1.1)$$

$$W_E = P_E \cdot \eta_E \cdot t \quad (1.2)$$

Da bei Schienenverkehrsmitteln die Reibung zwischen Rad und Schiene relativ gering ist, stellen die Hangabtriebskraft und die Luftwiderstandskraft die maßgeblichen Größen dar:

$$F_H = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (1.3)$$

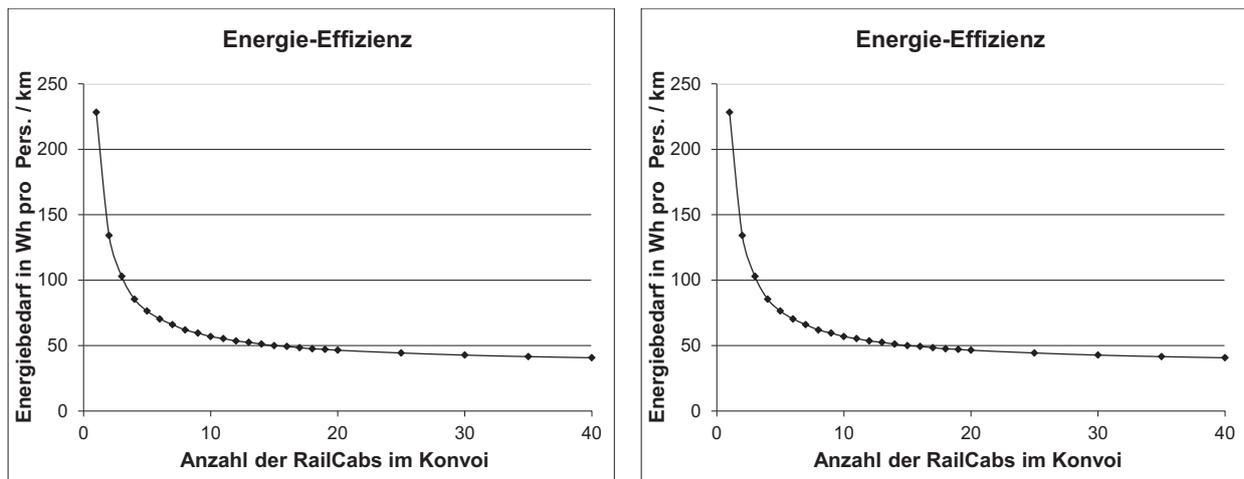
$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot c_w \cdot A_{\text{Fr}} \cdot (v_M + v_w)^2 \quad (1.4)$$

Maßgebliche Größen zur Berechnung der Luftwiderstandskraft sind die Dichte der Luft  $\rho_{\text{Luft}}$  und die Frontquerschnittsfläche  $A_{\text{Fr}}$ . Zudem muss auch die Windgeschwindigkeit  $v_w$  berücksichtigt werden.

In [Glü85] wird eine Formel zur Berechnung des Luftwiderstandsbeiwertes von Zugverbänden vorgeschlagen, die auf Untersuchungen im Windkanal basiert und empirisch ermittelt wurde. Diese Formel kann für moderne Schnellzüge angewendet werden. Der  $c_w$ -Wert beinhaltet die Beiwerte für den Bug- und Heckanteil, Anteile, die von der Länge des Zuges abhängen sowie von Türen  $c_{w,TR}$ , Fenstern  $c_{w,FT}$  und Rädern  $c_{w,Rad}$ . Die Größe  $A_O$  stellt die Oberfläche des Fahrzeugs dar ( $7,4 \text{ m}^2$ ),  $A_S$  entspricht einer Bezugsfläche von  $10 \text{ m}^2$ . Zudem fließt die Zuglänge  $l_{\text{Zug}}$  in die Abschätzung des  $c_w$ -Wertes ein.

$$c_W = c_{W,Bug} + c_{W,Heck} + 1,1 \cdot \frac{A_0}{A_S} \cdot [8,1 + 1,6 \cdot \log(l_{Zug}/m)]^{-2,5} + c_{W,Tr} + c_{W,FT} + c_{W,Rad} \quad (1.5)$$

Mit entsprechenden Werten für die einzelnen Koeffizienten nach [Glü85] kann der  $c_W$ -Wert in Abhängigkeit der im Konvoi fahrenden Fahrzeuge abgeschätzt werden. Dabei wird ein minimaler Abstand von wenigen Zentimetern angenommen. Der Luftwiderstandsbeiwert verhält sich in etwa linear zu der Fahrzeuganzahl und ist in Bild 1.2 a) dargestellt.



**Bild 1.2 a) Luftwiderstandsbeiwert**

**b) Spezifischer Energiebedarf des RailCabs je Sitzplatzkilometer**

Mit dem Wirkungsgrad der elektrischen Energieversorgung (Energieverteilungsnetz ca. 85% und Energieerzeugung ca. 42% für das gesamte Stromnetz in Deutschland, [SLL10]) sowie dem Wirkungsgrad des Antriebs (Annahme: 70%, [Sch09]) kann der elektrische Energiebedarf pro Fahrgastkilometer angegeben werden in Abhängigkeit der Anzahl der im Konvoi fahrenden Fahrzeuge und bei der hier angestrebten Reisegeschwindigkeit von 160 km/h (Bild 1.2 b).

Zum Vergleich ist in Tabelle 1.1 der spezifische Energiebedarf je Sitzplatzkilometer bei verschiedenen Reisegeschwindigkeiten jeweils für einen voll besetzten Transrapid 08 und ICE 3 angegeben [SJN06].

Der Vergleich macht deutlich, dass ein Konvoibetrieb zumindest im Bereich der vorgesehenen Reisegeschwindigkeit von 160 km/h erforderlich ist, um energetisch mit den Verkehrsmitteln Transrapid und ICE 3 mithalten zu können.

Eine weitere wichtige Größe zur Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Transportsystems stellt zudem die Transportkapazität dar. Diese wird üblicherweise durch die Anzahl von Zügen bzw. Passagieren pro Gleis und Zeiteinheit angegeben ( $N_{max}$ ). Maßgeblich

sind folglich die Anzahl der Passagiere pro Zugeinheit sowie das eingesetzte Abstandshalte- bzw. Zugfolgeverfahren. Der Maximalwert der Streckenkapazität ergibt sich aus der Zeitspanne  $\Delta T$  zwischen Fahrzeugen, die einen festen Streckenpunkt passieren bei Vollausslastung der Strecke [Ioa97].

**Tabelle 1.1 Spezifischer Energiebedarf je Sitzplatzkilometer**

Reisegeschwindigkeit in km/h	Energiebedarf Transrapid 08 in Wh/km	Energiebedarf ICE 3 in Wh/km
150	43,4	40,1
300	78,7	124,4
400	121,9	-

Wird die Vorausschau der Linienzugbeeinflussung (LZB) ( $s_{LZB} = 4000$  m bei einer Reisegeschwindigkeit von  $v_M = 160$  km/h) einbezogen und eine Zuglänge  $l_{Zug}$  von ca. 400 m (Doppelzug vom Typ ICE 3 – Baureihe 403) angenommen, ergibt sich folgender Durchsatz:

$$N_{\max} = \frac{1}{\Delta T} = \frac{v_M}{s_{LZB} + l_{Zug}} = \frac{160 \text{ km/h}}{4,4 \text{ km}} \approx 36 \frac{1}{\text{h}} \quad (1.6)$$

Für einen ICE 3 mit 908 Sitzplätzen ergibt sich bei dieser Betriebsweise theoretisch somit ein Durchsatz von 32688 Passagieren pro Spur und Stunde. Gemäß der heutigen Praxis, nicht im Bremsabstand zu fahren, sondern größere Zugfolgeabstände einzuhalten, verringert sich entsprechend die Leistungsfähigkeit.

Die Zugsicherungstechnik European Train Control System Level 3 (ETCS 3) sieht jedoch sogar das Fahren im absoluten Bremswegabstand nach dem Moving Block-Verfahren vor [Krü03]. Der Bremsweg  $s_b$  eines herkömmlichen Zuges wird bei einer Geschwindigkeit  $v_M$  von 160 km/h mit 2 km angegeben [Sch07]. Folglich wird beim Fahren im absoluten Bremsabstand mit 160 km/h für einen Zug mit der Länge 400 m ein Fahrzeugdurchsatz  $N_{\max}$  pro Spur erreicht in Höhe von:

$$N_{\max} = \frac{v_M}{s_b + l_{Zug}} = \frac{160 \text{ km/h}}{2,4 \text{ km}} \approx 66 \frac{1}{\text{h}} \quad (1.7)$$

Mit dieser Betriebsart würde ein ICE 3 theoretisch einen Durchsatz von 59928 Passagieren pro Stunde erreichen. Werden nun RailCab-Konvois gebildet, die z.B. aus 20 Fahrzeugen (mit einer Länge von jeweils ca. 10 m) bestehen, und wird zwischen den Konvois ein Abstand von beispielsweise 1 km eingehalten, ergibt sich:

$$N_{\max} = \frac{v_M}{s_b + l_{\text{Zug}}} \cdot 20 \frac{1}{\text{h}} = \frac{160 \text{ km/h}}{1,2 \text{ km}} \cdot 20 = 2666 \frac{1}{\text{h}} \quad (1.8)$$

Bei einer Sitzplatzkapazität von 20 pro Fahrzeug ergibt sich eine Kapazität von 53320 Passagieren pro Spur und Stunde.

Folglich ermöglicht der Konvoibetrieb der RailCabs in der zuvor dargestellten Betriebsweise eine höhere Transportkapazität als eine mit Zügen vom Typ ICE 3 maximal genutzte Strecke nach dem Prinzip der Linienzugbeeinflussung. Wird das Moving Block-Verfahren eingesetzt, liegt die Kapazität der RailCabs etwas unterhalb der Kapazität des ICE 3.

Zudem muss hierbei erwähnt werden, dass das RailCab-System durch die Vielzahl an kleinen, nicht gekoppelten Fahrzeugen eine enorme Flexibilität bietet, die sich vor allem gegenüber häufig gering ausgenutzten traditionellen Bahnfahrzeugen zusätzlich positiv auswirkt. Der autonome Konvoibetrieb resultiert folglich in einer Leistungssteigerung gegenüber herkömmlichen Schienentransportsystemen bei einem gleichzeitigen Gewinn an Reisekomfort.

## **Ziele und Inhalte dieser Arbeit**

In dieser Arbeit wird der autonome Fahrzeugbetrieb der RailCabs untersucht. Im Fokus steht dabei, dass die Fahrzeuge im Konvoibetrieb kooperativ agieren. Der autonome Konvoibetrieb stellt zudem sehr hohe Anforderungen an die Betriebssicherheit des Verkehrssystems, so dass den Themen Sicherheit und Störfallbeherrschung eine besondere Bedeutung zukommt. Nachfolgend sind die Kernpunkte dieser Arbeit aufgelistet und kurz beschrieben:

- Systemkonzept Neue Bahntechnik Paderborn– RailCab: Die Komplexität des RailCabs erfordert systematische Entwurfs- und Strukturierungsmethoden. Der Entwurf von Regel-, Steuerungs- und Sicherheitsfunktionen erfordert eine genaue Analyse des Systemkonzepts (insbesondere von Antrieb und Energiemanagement) sowie eine Modellierung von Fahrzeug und Umfeld. Ebenso werden in Kap. 2 relevante Technologien und Anwendungen aus anderen Projekten vorgestellt und diskutiert.
- Betriebsleittechnik: Es ist eine Betriebsleittechnik erforderlich, die einen autonomen und sicheren Betrieb von einzelnen Fahrzeugen ermöglicht. Die Betriebsleittechnik beinhaltet auch die Koordination und Organisation von verteilten Systemen, da die Fahrzeuge nicht nur autonom betrieben werden, son-

dem auch Aufgaben kooperativ ausführen. Dies impliziert die Möglichkeit einer automatischen Adaption an veränderliche Umgebungsbedingungen, um einen sicheren Betrieb auch bei Stör- und Notfällen ermöglichen zu können. Die Betriebsleit- und Sicherungstechnik, die für den Betrieb von mehreren Fahrzeugen auf der Versuchsanlage erforderlich ist und die Basis zur Realisierung von autonomen Konvoifahrten ist, wird in Kap. 3 vorgestellt.

- Arbeitspunktsteuerung des Linearmotors: Da zum Antreiben und Bremsen der vorgestellten Anwendung ein doppelt gespeister Linearmotor eingesetzt wird, erfolgt über den Stator eine motorseitige Verkopplung zwischen Fahrzeugen im Konvoibetrieb. Dies erfordert ein kooperatives Energiemanagement, das einerseits bereits durch die Betriebsleittechnik gewährleistet werden muss und andererseits auch den Entwurf von Betriebsstrategien erfordert, um hinsichtlich der Kraftentwicklung als auch der Leistungsübertragung ein optimales Betriebsverhalten zu erzielen. Kap. 4 beschreibt daher zunächst die motorseitige Verkopplung zwischen Fahrzeugen, die sich auf einem gemeinsamen Statorabschnitt befinden. Des Weiteren werden hier Ansätze erläutert, die zu einem optimalen Energiemanagement in diesen Betriebsfällen führen.
- Regelung der Fahrzeuglängsdynamik: Es sind Regelverfahren zu entwerfen, die eine präzise und schnelle Regelung der Fahrzeuglängsbewegung auch im Hinblick auf Komfortgrößen gewährleisten. Ziel ist die Entwicklung einer optimalen Betriebsstrategie für das Bilden und Auflösen eines Konvois sowie für die Folgefahrt im Konvoibetrieb. Die Regelung der Fahrzeuglängsbewegung ist in Kap. 5 dargestellt. Dort wird zunächst die Regelung eines Einzelfahrzeugs vorgestellt, ehe Strategien zur Konvoibildung und zum Konvoibetrieb erarbeitet werden.
- Sicherheitstechnik und Störfallmanagement: Aufbauend auf der Methodik zur autonomen Fahrzeugführung sind weitere sicherheitstechnische Maßnahmen zu ergreifen, die eine automatische Erkennung von Stör- und Notfällen garantieren. Dazu gehört auch ein Störfallmanagement, das automatisch zustandsbedingte Sicherheitsroutinen einleitet. In Kap. 6 wird der autonome Betrieb der Fahrzeuge vor allem vor dem Hintergrund der sicherheitskritischen Konvoifahrt vorgestellt. Anhand einer Fehler- und Gefahrenanalyse wird eine automatische Fehlererkennung realisiert. Dieses Kapitel schließt ab mit einem Störfallmanagement, das einen stets sicheren Betrieb auch im Störfall überhaupt erst ermöglicht.



## **2. Strukturierung und Systembeschreibung**

Das RailCab Transportsystem besteht aus vielen kleinen Einzelfahrzeugen, die autonom agieren und miteinander kooperieren. Die darin begründete hohe Systemkomplexität erfordert eine methodische und strukturierte Herangehensweise.

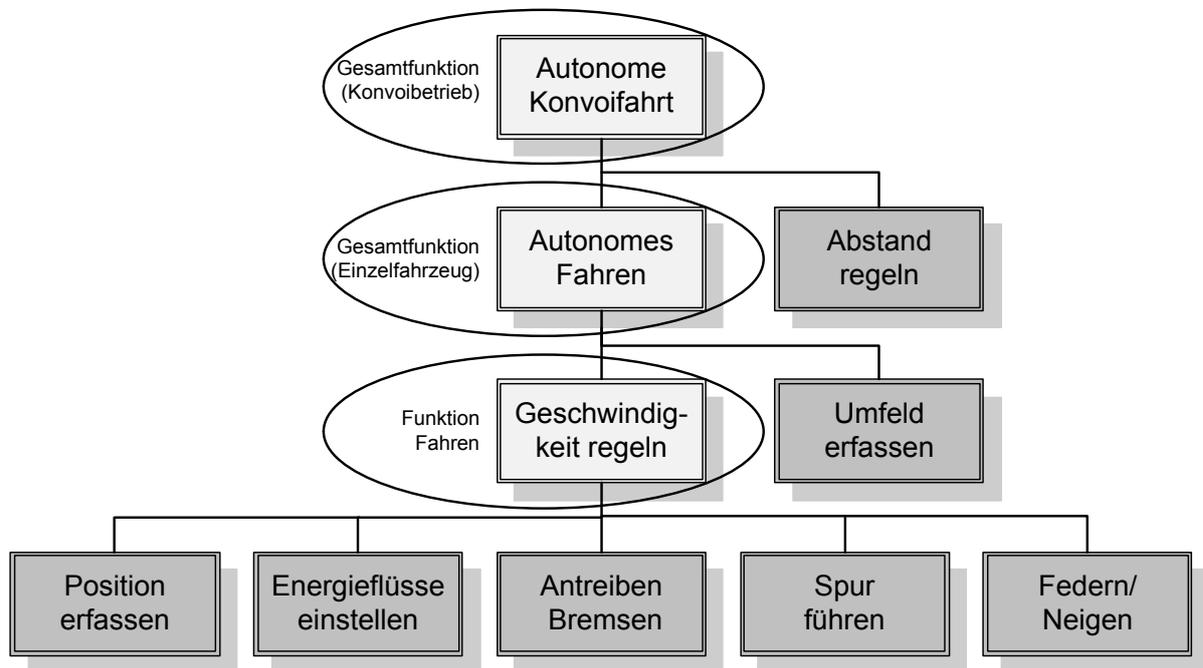
In diesem Kapitel werden daher zunächst die Systemanforderungen für autonome Konvoifahrten dargestellt. Ferner werden die methodischen Ansätze, die zur Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme angewendet werden, erläutert. Anschließend wird das RailCab-Versuchssystem beschrieben. Dazu werden die Linearantriebstechnik, die Energieversorgung der Fahrzeuge sowie die Modellierung von Fahrzeug und Umfeld vorgestellt. Zudem werden Vor- und Nachteile ähnlicher Projekte aus dem Bereich der Transporttechnik diskutiert, die sich ebenfalls mit autonomer Fahrzeugführung, kooperierenden und intelligenten Teilsystemen sowie mit abstandsgeregelten Einzelfahrzeugen befassen.

### **2.1 Funktionsbeschreibung der autonomen Konvoifahrten**

Ein bewährter Ansatz für den Entwurf mechatronischer Systeme ist die Definition von Funktionen und Funktionshierarchien [BP97]. Ist die Gesamtfunktion eines Systems als komplex anzusehen, so ist eine Zerlegung in Teilfunktionen und Grundfunktionen sinnvoll. Während als Teilfunktionen Funktionen mit geringerer Komplexität angesehen werden, besitzen Grundfunktionen einfache Aufgaben wie beispielsweise die Energieversorgung.

Angewendet auf das RailCab bedeutet dies, dass das AUTONOME FAHREN als Gesamtfunktion des mechatronischen Systems RailCab angesehen werden kann, da bezogen auf ein einzelnes Fahrzeug alle unterlagerten Funktionen (Teilfunktionen bzw. Grundfunktionen) wie z.B. Energieversorgung, Antrieb etc. dazu beitragen, dass ein Fahrzeug einen Fahrauftrag erfolgreich abarbeiten kann. Werden Fahrzeuge im Konvoi betrieben, wird die AUTONOME KONVOIFAHRT als Gesamtfunktion angesehen und basiert dann auf der

Teilfunktion AUTONOMES FAHREN und dessen wiederum unterlagerten Funktionen (siehe Bild 2.1).



**Bild 2.1 Funktionsorientierter, hierarchischer Systemaufbau**

Aus der Anforderung, dass die RailCabs sich autonom zu berührungslosen Konvois zusammenschließen sollen und der Abstand zwischen den Fahrzeugen möglichst gering sein soll, ergeben sich die drei wesentlichen Funktionen FAHRBEWEGUNG REGELN, AUTONOMES FAHREN und AUTONOME KONVOIFAHRT, auf denen die autonome Konvoifahrt basiert. Diese Funktionen müssen den nachfolgenden Systemanforderungen genügen.

- Fahrzeugbewegung regeln: Es wird ein zuverlässiger Antrieb benötigt, der eine möglichst präzise Schubkraftbildung bietet, die unabhängig von äußeren Einflüssen wie z.B. Witterungsbedingungen ist. Daher wird, wie in [Hen03] bereits ausführlich beschrieben, ein doppelt gespeister Linearantrieb eingesetzt, der aufgrund seiner asynchronen Betriebsweise neben dem Antreiben und Bremsen des Fahrzeugs auch zur berührungslosen Leistungsübertragung ins Fahrzeugbordnetz genutzt wird. Um diese Funktion auch im Konvoibetrieb bei gemeinsamer Nutzung eines Statorabschnitts ausüben zu können, müssen Strategien für ein kooperatives Energiemanagement eingesetzt werden. Der doppelt gespeiste Linearmotor ist räumlich verteilt angeordnet und bedarf daher zudem nach [Pot06] einer Kommunikationstechnik.
- Autonomes Fahren: Die kleinen Einzelfahrzeuge werden fahrerlos betrieben. Diese hochgradige Systemautomatisierung erfordert eine umfangreiche Be-

triebsleit- und Sicherungstechnik sowie Einrichtungen zur Umfelderkennung. Neben Strategien zur Realisierung von Konvoimanövern müssen insbesondere auch etwaige Systemstörungen sicher erkannt und beherrscht werden, um stets Sicherheit und Zuverlässigkeit im Fahrbetrieb gewährleisten zu können.

- Autonome Konvoifahrt: Die Fahrzeuge müssen Fahrprofile präzise abfahren können, so dass auch Fahrzeugabstände exakt eingeregelt werden können. Zudem sind Strategien zum Ausführen von Fahrmanövern zur Konvoibildung bzw. zur Konvoiauflösung erforderlich.

Diese vielfältigen Anforderungen zeigen, dass die als Gesamtfunktion definierte Autonome Konvoifahrt auf unterschiedlichen Teilfunktionen unmittelbar aufbaut. Zur Beherrschung dieser Systemkomplexität und der engen Vernetzung von Teilfunktionen wird die Entwicklungsmethodik nach [VDI03], [Hes06], [LHL01], [Nau00] aufgegriffen und im Folgenden beschrieben.

## 2.2 Strukturierungsmethoden und Systementwurf

Die angewendete Entwicklungsmethodik geht über die zuvor vorgestellten Funktionsdefinitionen hinaus. Die Funktionen werden dabei auf einzelne Systemelemente projiziert, die durch die Strukturierungsmittel Modularisierung und Hierarchisierung definiert werden. Während mit Modularisierung die Kapselung von Funktionalitäten gemeint ist, bedeutet Hierarchisierung die Zusammenfassung von Modulen zu höherwertigen Aggregaten mit hierarchischen Strukturen und eindeutigen Schnittstellen [Nau00]. Sinnvoll ist es zudem, die Strukturierungsmittel durchgängig auf alle Systemkomponenten anzuwenden.

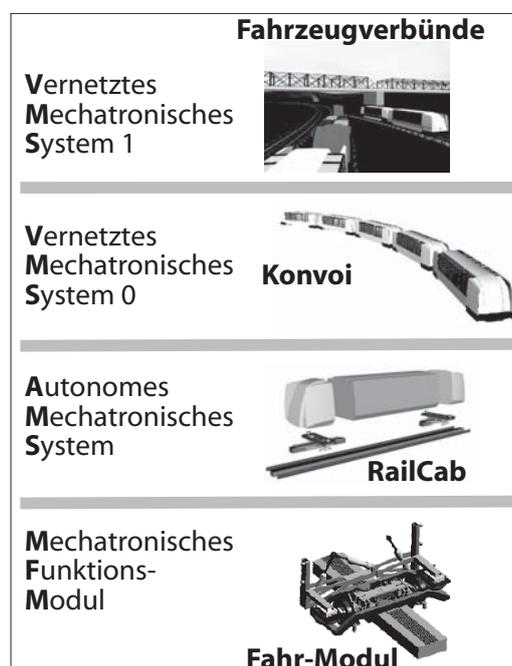
### 2.2.1 Modularisierung und Hierarchisierung am Beispiel RailCab

Nach [Nau00] ist eine Strukturierung durch die Formulierung von Funktionen sinnvoll, um das Verhalten eines Systems unabhängig von der Realisierung beschreiben zu können. Die Mittel Modularisierung und Hierarchisierung führen dann zu folgenden Systembezeichnungen [ADG+09]:

- Mechatronisches Funktionsmodul (MFM): Ein MFM stellt das Basiselement eines mechatronischen Systems dar und besteht aus Aktorik, Sensorik und Informationsverarbeitung. Ein RailCab beinhaltet mit dem Antriebs- und Bremsmodul, dem Energieversorgungsmodul, dem Spurführungsmodul und dem Feder- Neigemodul insgesamt vier MFM.

- Mechatronische Funktionsgruppe (MFG): Nach [ADG+09] ist der Begriff der Mechatronischen Funktionsgruppe eingeführt worden, um Systeme zu beschreiben, die aus Informationsverarbeitung und zugehöriger Sensorik bestehen, aber über keine Aktorik verfügen.
- Autonomes Mechatronisches System (AMS): Werden verschiedene MFM und/oder MFG innerhalb einer verbindenden Tragstruktur zusammengefasst, so entsteht auf oberster Ebene ein System, das autonom in seiner Umgebung agieren kann. In diesem Kontext wird ein einzelnes RailCab als AMS angesehen.
- Vernetztes Mechatronisches System (VMS): Unter einem VMS werden verkoppelte AMS verstanden. Ein VMS verfügt dabei nicht über eigene Rechenhardware. Seine Funktionen werden in den Ressourcen der AMS abgebildet. Ein autonomer RailCab-Konvoi stellt daher ein VMS dar.

Mit dieser Systemstruktur ist der direkte Bezug zu den Gesamtfunktionen für den Einzelfahrzeugbetrieb (AMS) bzw. für die Konvoifahrt (VMS) erkennbar (Bild 2.2).



**Bild 2.2** Mechatronische Strukturebenen des RailCab-Systems nach [ADG+09]

Der Zusammenhang zwischen der funktionsorientierten Darstellung und den mechatronischen Strukturebenen ist in Tabelle 2.1 zu sehen. Dort ist eine Übersicht über die Grund- und Teilfunktionen dargestellt, aus denen sich die Gesamtfunktion Autonome Konvoifahrt zusammensetzt. Zudem ist eine Bewertung der energetischen und informationstechnischen Verkopplungen enthalten.

**Tabelle 2.1 Verkopplungen zwischen der Gesamtfunktion Autonome Konvoifahrt und unterlagerten Teil- und Grundfunktionen**

Teilfunktion	Strukturierungsebene	Energetische Verkopplung	Informationstechnische Verkopplung
Antreiben / Bremsen	MFM	++	++
Energieflüsse einstellen	MFM	++	++
Autonomes Fahren	AMS	-	++
Abstand regeln	VMS	+	++
Grundfunktion			
Spur führen / Lenken	MFM	-	+
Federn / Neigen	MFM	-	+
Position erfassen	MFG	-	++
Umfeld erfassen	MFG	-	++

Legende: - keine Verkopplung + Verkopplung ++ starke Verkopplung

Eine weitere wichtige Eigenschaft dieser Strukturierungsmethode ist die Übersichtlichkeit und Reduktion von Informationsflüssen zwischen den unterschiedlichen Teilsystemen. Es werden jeweils nur die erforderlichen Daten übertragen. Im Falle des Spurführungsmoduls reicht es vollkommen aus, lediglich den Systemzustand auf AMS-Ebene zu kennen, um z.B. die Fahrgeschwindigkeit anpassen zu können. Auf diese Weise kann der Datentransfer erheblich reduziert werden. Ebenso müssen die Leistungsflüsse zwischen Teilsystemen dargestellt werden, um energetische Wechselwirkungen herauszustellen, die beim Systementwurf zwingend berücksichtigt werden müssen.

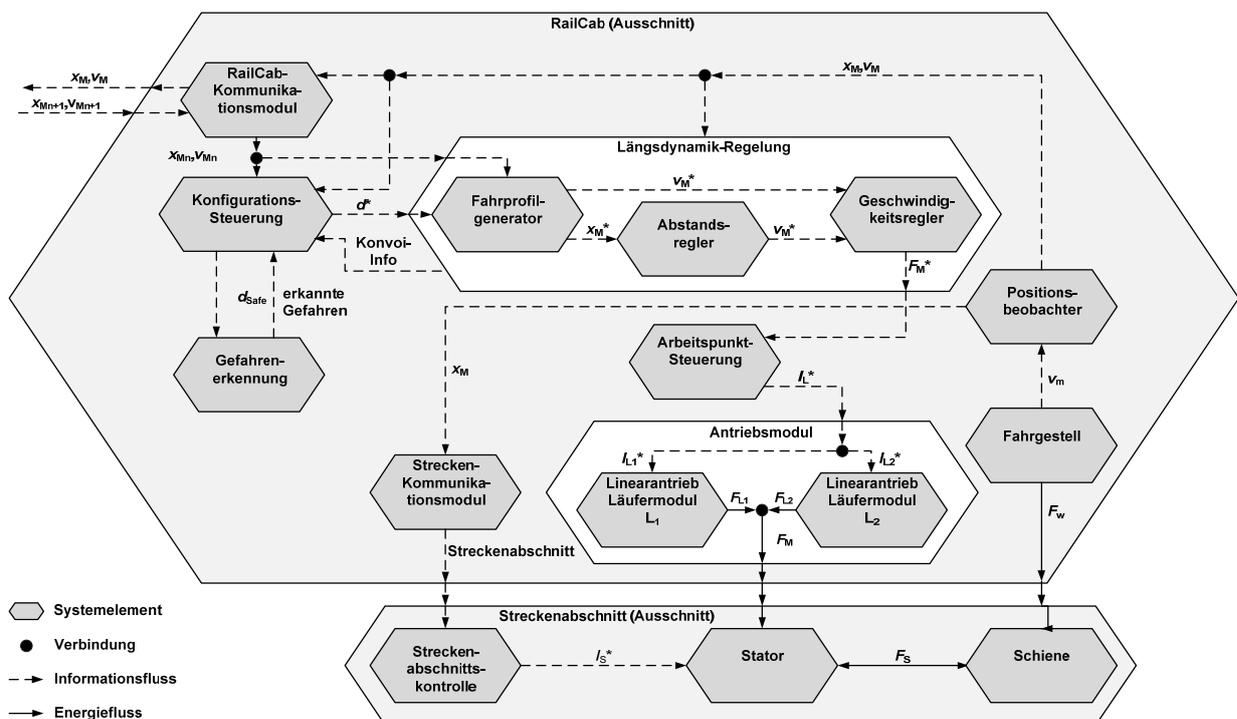
### Wirkstrukturen als Lösungsmuster

Der Entwurf mechatronischer Systeme bedient sich unterschiedlicher Spezifikationstechniken. Im Rahmen des SFB 614 wurde dazu die Beschreibung der Prinziplösung entwickelt. Diese Spezifikationstechnik ist in [Fra06] und [GEK01] erläutert. Die Komplexität von Systemen und die Unterschiede in den Verhaltensarten der Teilsysteme erfordert eine Unterteilung in Partialmodelle. Die Wechselwirkungen zwischen den Partialmodellen müssen dann analysiert werden. Anhand der Prinziplösungen wird der domänenspezifische Systementwurf vorgenommen und die Lösung weiter konkretisiert. Die Anwendung

dieser Entwurfstechnik auf die autonome Konvoifahrt ist in [GFH+07] und [GFL+07] dargestellt. Dabei wurde eine domänenübergreifende Spezifizierung vorgenommen, um insbesondere Wechselwirkungen und Interaktionen zwischen verschiedenartigen Modulen zu beschreiben. Der integrative Ansatz in der Beschreibung der Prinziplösung erleichtert den Systementwurf. Insbesondere für die autonome Konvoifahrt müssen aufgrund der Funktionskomplexität sämtliche Einflüsse der unterlagerten Teil- und Grundfunktionen genau beschrieben werden.

Sind die erforderlichen Funktionen definiert und die prinzipiellen Systemstrukturen zugeordnet, kann eine weitere Detaillierung vorgenommen werden. Das Lösungsmuster Wirkstruktur drückt dabei die Verhaltensbeschreibung aus, indem die einzelnen Systemelemente und deren Wechselwirkungen in Form von Energie- und Informationsflüssen dargestellt werden (siehe Bild 2.3). Die Systemelemente repräsentieren das System (RailCab), Subsysteme (z.B. Längsdynamikregelung) sowie Hardware oder Software (z.B. Abstandsregler).

Anhand der strukturellen Darstellung kann die Lösung weiter konkretisiert werden, indem in den jeweiligen Domänen die Module und Komponenten entworfen werden – unter Berücksichtigung der in der Wirkstruktur dargestellten vielfältigen Wechselwirkungen. Die Entwürfe der für die Konvoifahrt erforderlichen Subsysteme und Systemelemente werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.



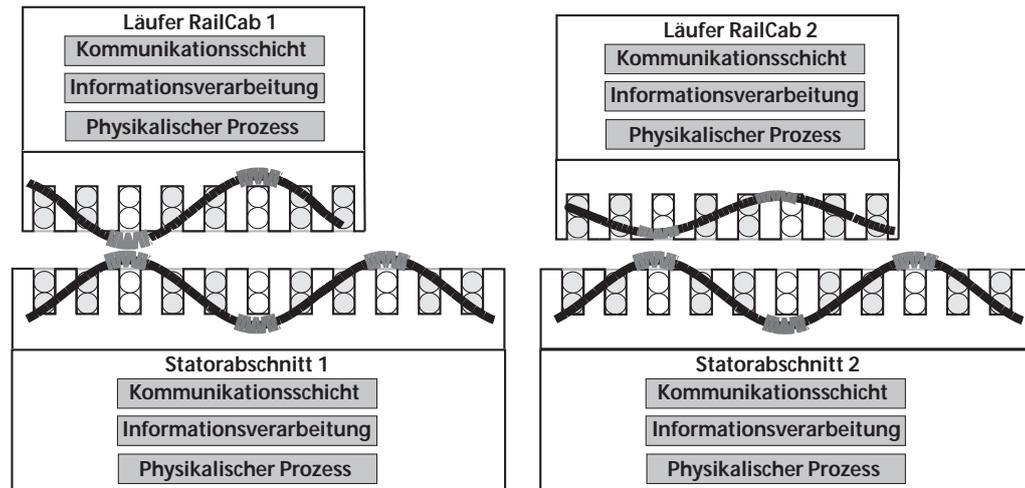
**Bild 2.3** Ausschnitt aus der Wirkstruktur des RailCabs [EMS10]

### 2.2.2 Struktureller Aufbau verteilter Systeme

Die Interaktion von RailCabs im Konvoi stellt wie oben beschrieben ein Vernetztes Mechatronisches System (VMS) dar. Offen sichtbar ist dabei die räumliche Verteilung der Teilsysteme die einerseits voneinander unabhängig, also autonom arbeiten, aber zusammen eine bestimmte Aufgabe erfüllen. Da die Teilprozesse koordiniert werden müssen, ist eine Datenkommunikation zwischen den einzelnen Komponenten zwingend erforderlich [Pot06]. Aber nicht nur ein Fahrzeugkonvoi repräsentiert ein räumlich verteiltes mechatronisches System. Dies trifft ebenso auf den Antrieb zu.

Als Beispiel für ein räumlich verteiltes mechatronisches System ist daher in Bild 2.4 der Antrieb (doppelt gespeister Linearmotor) eines RailCabs dargestellt. Die verteilten Systeme sind durch drei Bestandteile gekennzeichnet. Während der Aktor den Ablauf des physikalischen Prozesses beeinflusst, werden die Stellgrößen innerhalb der Informationsverarbeitung generiert. Damit die Teilsysteme (Läufer und Stator) aber auch kooperieren können, verfügen diese jeweils auch über eine weitere Schicht, die eine Kommunikation ermöglicht. Folglich laufen auf den einzelnen Systemen dezentrale Algorithmen, die in ihrem Zusammenwirken die eigentliche Funktion ergeben. Ein Austausch sämtlicher Informationen zwischen den Teilsystemen würde einerseits die Komplexität des Systems erhöhen, andererseits würden unter Umständen die Netzwerkverbindungen überlastet. Diese Systemarchitektur wird durch nachfolgende Eigenschaften charakterisiert [TV03]:

- Kein Teilsystem verfügt über sämtliche Systeminformationen.
- Teilsysteme treffen ihre Entscheidungen autonom anhand der ihnen zur Verfügung stehenden Informationen.
- Ein Teilausfall führt nicht zwangsläufig zu einem Totalausfall.
- Eine Synchronisierung der Teilsysteme kann z.B. durch eine globale Uhr oder einen zentralen Taktgeber erfolgen.

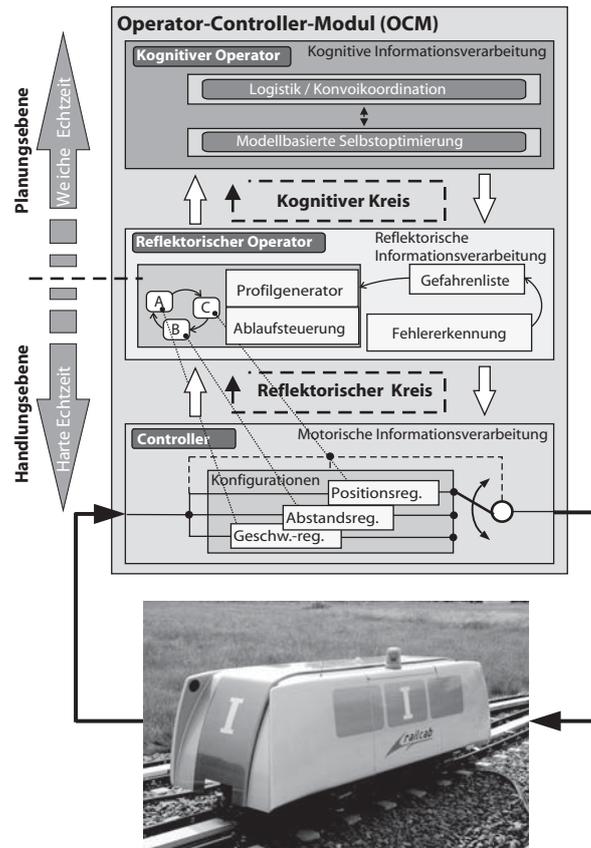


**Bild 2.4** Aufbau eines räumlich verteilten mechatronischen Systems am Beispiel des RailCabs-Antriebs

Dementsprechend müssen beim Entwurf der Komponenten und Module insbesondere auch die Informationsschnittstellen definiert werden. Wird ein geschlossenes System aufgebaut, so werden vorwiegend drahtgebundene Kommunikationskanäle verwendet. Sind jedoch räumlich verteilte Systemkomponenten vorhanden, so wird gegebenenfalls eine drahtlose Kommunikation eingerichtet, die üblicherweise eine geringere Performanz und eine höhere Fehleranfälligkeit aufweist. Diese beiden Eigenschaften müssen bereits beim Systementwurf berücksichtigt werden.

### 2.2.3 Operator-Controller-Modul (OCM) RailCab

Die Informationsverarbeitung eines mechatronischen Systems wird nach [Nau00] als OPERATOR-CONTROLLER-MODUL (OCM) bezeichnet und als dreistufiges System verstanden. Hinsichtlich der in dieser Arbeit betrachteten Regelungsstrategien für den autonomen Fahrbetrieb weist das OCM RailCab die in Bild 2.5 dargestellte Struktur auf.



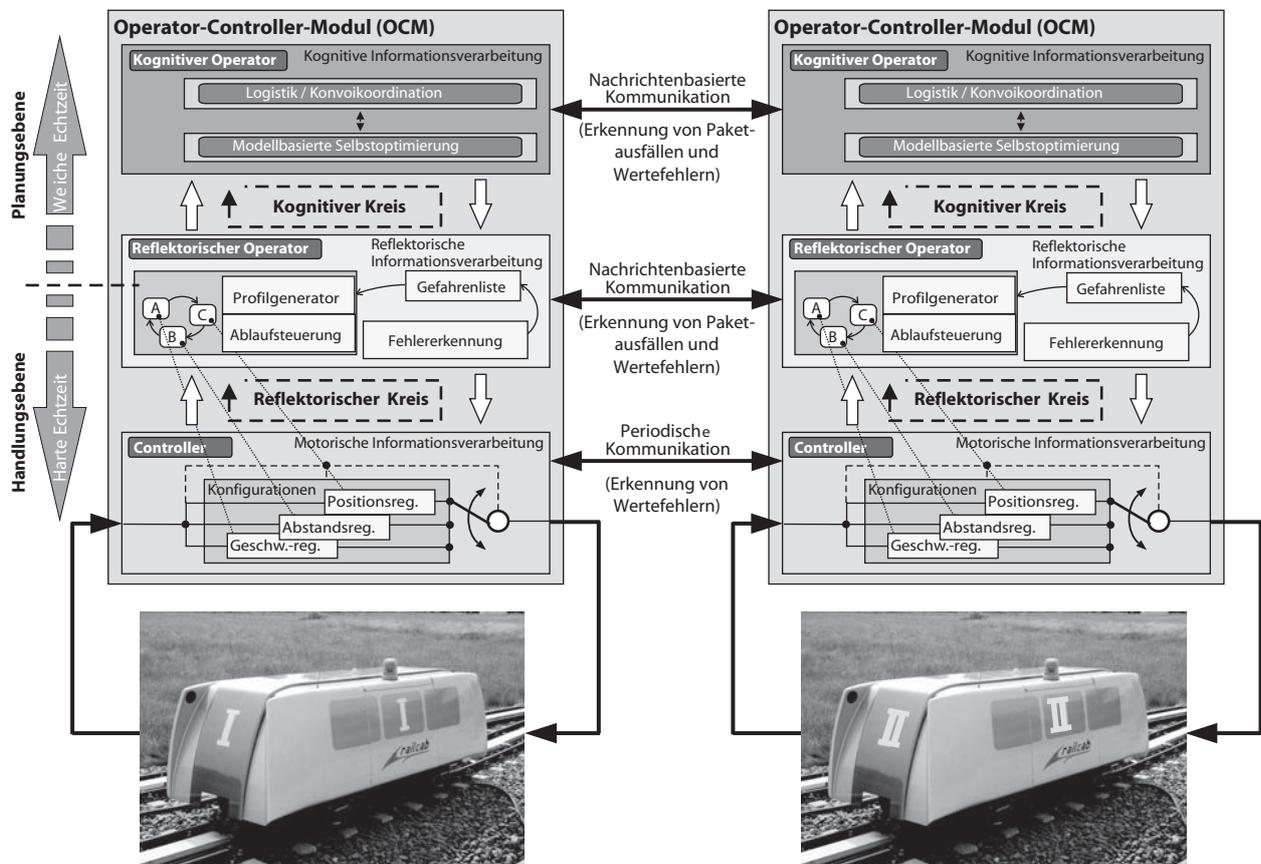
**Bild 2.5 Operator-Controller-Modul (OCM) RailCab**

Das OCM umfasst nach [FGK+04] die drei Komponenten CONTROLLER, REFLEKTORISCHER OPERATOR und KOGNITIVER OPERATOR. Während der Controller unter harten Echtzeitbedingungen für die Regelung der Fahrzeugbewegung verantwortlich ist, findet auf der Ebene des reflektorisches Operators die Systemsteuerung statt. Diese umfasst neben der Ablaufsteuerung auch die Störfallüberwachung sowie die Fahrprofilgenerierung. Im reflektorisches Operator findet der Übergang zur weichen Echtzeit statt. Dritter Bestandteil des OCM ist der kognitive Operator, der eine Planungsebene darstellt und beispielsweise Optimierungsaufgaben bezüglich der Fahrprofilgenerierung ausführt.

### Interagierende OCM auf VMS-Ebene

Im Konvoibetrieb agieren die RailCabs nicht mehr isoliert, sondern kooperativ miteinander. Folglich sind Kommunikationsstrukturen zwischen den einzelnen Operator-Controller-Modulen RailCab erforderlich (siehe Bild 2.6). Die Kommunikation wird je nach Modulkomponente getrennt betrachtet, da unterschiedliche Anforderungen an Datenmengen, Übertragungszeiten und Fehlertoleranzen gestellt werden. Dementsprechend findet zwischen den Controllern eine periodische Kommunikation statt, die zum Austausch regelungstechnischer Größen wie z.B. Geschwindigkeit und Position dient. Auf

der zweiten Ebene wird hingegen eine azyklische Kommunikation benötigt, durch die der Datenaustausch beispielsweise zur Konvoibildung nachrichtenbasiert erfolgt.



**Bild 2.6 Interagierende OCM RailCab**

Auf der dritten Ebene werden Daten ebenfalls nachrichtenbasiert kommuniziert, um Planungsaufgaben ausführen zu können. Für den Konvoibetrieb ist dabei vornehmlich von logistischen Aspekten auszugehen. Daher werden Aufgaben wie die optimale Fahrzeugreihenfolge sowie ein optimales Energiemanagement im Konvoi bearbeitet.

### 2.2.4 Weitere Entwicklungsmethodiken

Dem zuvor beschriebenen Systementwurf folgend, findet die detaillierte Entwicklung der einzelnen Systemelemente statt. Dazu werden neben etablierten Methoden (vgl. [GL00], [KBS+97]) weiterführende Entwicklungsmethodiken eingesetzt. Dies sind einerseits Methoden der formalen Analyse und insbesondere auch systematisches Testen mittels Virtual Prototyping. Die Methoden sowie deren Anwendung werden im Folgenden kurz beschrieben.

## Formale Analysen

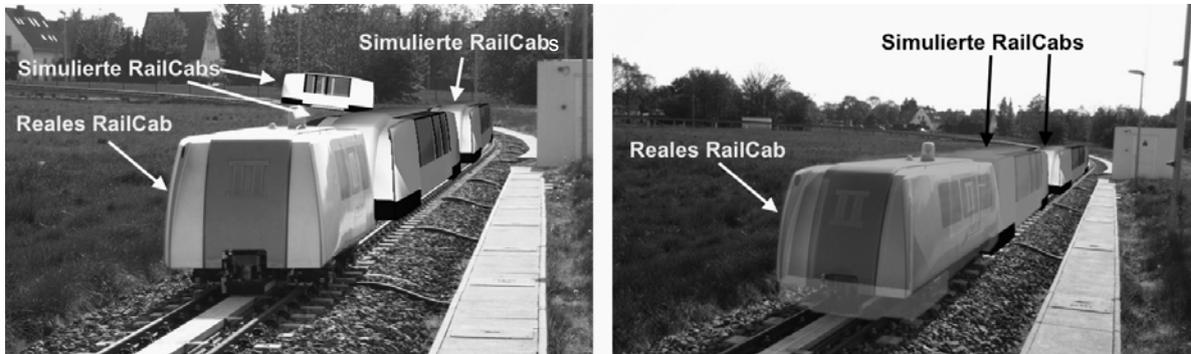
Model Checking ist eine häufig verwendete Methode, um Systembeschreibungen gegen eine Spezifikation zu prüfen. Bei komplexen Systemen ist dies jedoch aufgrund einer Exploration des Arbeitsraums meist nur schwer realisierbar. Durch die Anwendung des in Kap. 2.2.4 beschriebenen Systemaufbaus ist es jedoch möglich, einzelne geschlossene Systembestandteile getrennt zu verifizieren [ADG+09]. Durch die Dekomposition des Systems können dann formale Analysen auf jede einzelne Systemkomponente angewendet werden. Dies ist insbesondere für Echtzeitkoordinationsmuster möglich, deren Verhalten zunächst mit Mechatronic UML modelliert wird [Tic09]. So kann dann durch den Einsatz formaler Analysen für Echtzeitsysteme eine Verifikation der benötigten Sicherheitseigenschaften der Echtzeitkoordination bezüglich der relevanten Fehlerszenarien erreicht werden [GHH+06]. Die Anwendung dieser Methode zur Fehlerreduktion und damit zur Verifikation von Systemsicherheit wird in Kap. 6 aufgegriffen und ist in [Tic09] und [HTS+08b] beschrieben.

## Virtual Prototyping und Simulation

Virtual Prototyping ist mittlerweile zu einer häufig eingesetzten Entwicklungsmethode geworden. Insbesondere bei aufwendigen und kostspieligen Prototypen bietet sich ihr Einsatz an, um Entwicklungszeit und vor allem Kosten einzusparen. Beim Virtual Prototyping wird ein Rechnermodell des zu entwickelnden Objekts erstellt. Anhand dieses Modells können dann formelle sowie experimentelle Analysen durchgeführt werden. Schlüsseltechnologien sind dabei Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) sowie Simulation. Während mit VR und AR ein Prototyp repräsentiert wird, dient die Simulation beispielsweise zur Abbildung eines möglichst realitätsnahen Fahrverhaltens. Eine weitere Methode ist das automatische Testen. Dabei werden sinnvolle Stimuli erzeugt, mit denen das System angeregt wird, um relevante Systemzustände möglichst umfangreich testen zu können [ADG+09].

Bezogen auf den autonomen Konvoibetrieb der RailCabs dienen Simulation und Virtual Prototyping dem Abbilden und Testen einer höheren Anzahl von RailCabs, als die zwei zur Verfügung stehenden Versuchsfahrzeuge. Somit können weitere Fahrzeugmodelle generiert werden, die entweder komplett in einer Simulationsumgebung abgebildet sind oder als Hardware-in-the-Loop Modelle auch einen teilweise realen Versuchsaufbau besitzen [RH07], [RWH08]. Bild 2.7 a) zeigt Visualisierungen eines Konvois bestehend aus realen und simulierten Fahrzeugen auf der RailCab-Versuchsanlage. Mittels Augmented Reality können insbesondere sicherheitskritische Fahrmanöver, wie z.B. eine Konvoi-

fahrt, umfangreich getestet werden. In Bild 2.7 b) ist beispielhaft eine Visualisierung einer Kollision zwischen einem realen und einem simulierten Fahrzeug dargestellt. Die Methode des Virtual Prototyping wird in Kap. 3.1 weiter aufgegriffen.

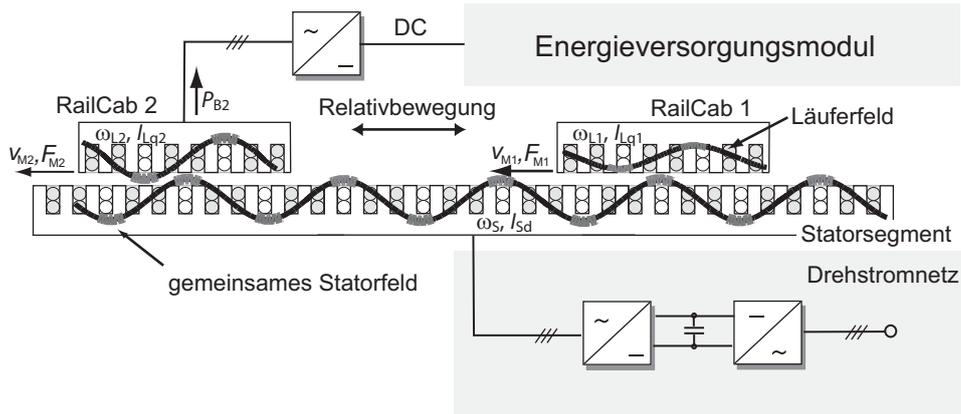


**Bild 2.7**      **Augmented Reality eines Konvois mit realen und simulierten RailCabs**  
a) Visualisierung eines Konvois      b) Visualisierung einer Kollision [RWH08]

## 2.3 RailCab – Antriebstechnik

Zum Antreiben und Bremsen wird für das RailCab-System ein doppelt gespeister asynchroner Linearmotor (DGALM) eingesetzt, der in [Hen03] detailliert vorgestellt wurde. Bei dieser Linearmotorvariante werden sowohl die Primärseite als auch die Sekundärseite aktiv gespeist. Der Primärteil ist zwischen den Schienen im Gleisbett verlegt und wird aus dem Drehstromnetz gespeist. Der Läufer befindet unterhalb des Fahrzeugs und wird aus dem Bordnetz mit Energie versorgt. Die prinzipielle Anordnung ist in Bild 2.8 dargestellt. Sowohl Stator als auch Läufer werden über Stromrichter gespeist, die es erlauben, jeweils einen frequenz- und amplitudenvariablen Strom einzuprägen.

Wird der doppelt gespeiste Linearmotor asynchron betrieben, so können Fahrzeuge Relativbewegungen zueinander ausführen. Dies stellt die Grundvoraussetzung für das Bilden und Auflösen von Fahrzeugkonvois während der Fahrt dar. Zudem erlaubt die asynchrone Betriebsweise des Motors, dass über den Motor nach dem transformatorischen Prinzip berührungslos Energie übertragen werden kann. Folglich kann auf Stromschienen oder Oberleitungen gänzlich verzichtet werden.



**Bild 2.8** Doppelt gespeister Linearmotor mit Energieversorgung [Yan04]

### 2.3.1 Schubkraftbildung des doppelt gespeisten Linearmotors

Zur Modellierung des Linearmotors wird, wie bei Drehstromantrieben gebräuchlich, auf die Verwendung von Raumzeigern zurückgegriffen [Sch09]. Die Orientierung dieser Raumzeiger im d, q-Koordinatensystem erfolgt am Statorstrom. Folglich ist auch dann ein gemeinsames Bezugssystem gegeben, wenn sich mehrere Fahrzeuge auf einem gleichen Statorabschnitt befinden. Detaillierte Herleitungen der nachfolgenden Zusammenhänge und Gleichungen sind in [Hen03] und [Pot06] dargestellt.

Analog zur Kraftbildung bei der fremderregten Asynchronmaschine ergibt sich für die Schubkraft  $F_M$ , die aus sich dem Statorstrom  $i_s$ , der Statorflussverkettung  $\psi_s$  und der Polteilung  $\tau_p$  ergibt.

$$F_M = \frac{3\pi}{2\tau_p} \cdot \text{Im}\{i_s \cdot \underline{\psi}_s^*\} \quad (2.1)$$

Zur verlustoptimalen Kraftbildung werden die beiden Ströme auf Stator- und Läuferseite orthogonal ( $i_{sd}$  und  $i_{Lq}$ ) zueinander ausgerichtet. Übertragen auf den doppelt gespeisten Linearmotor ergibt sich unter Berücksichtigung der Orientierung am Statorraumzeiger:

$$F_M = \frac{3\pi}{2\tau_p} \cdot \frac{L_h}{\ddot{u}} \cdot i_{sd} \cdot i_{Lq} = k_M \cdot i_{sd} \cdot i_{Lq} \quad (2.2)$$

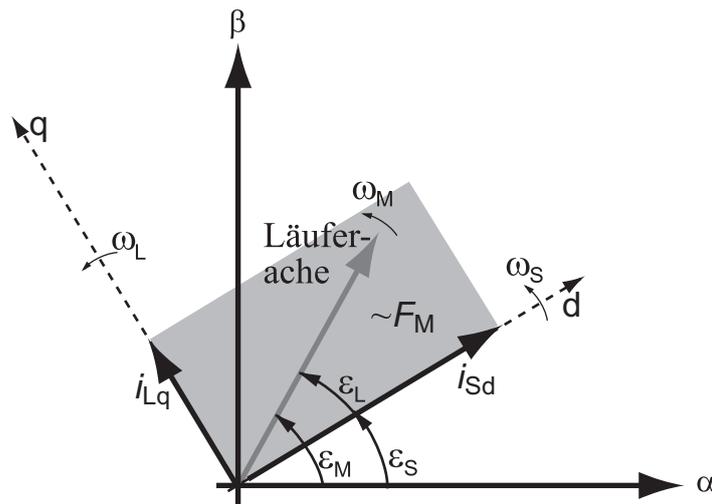
$L_h$  entspricht dabei der Hauptinduktivität,  $\ddot{u}$  dem Übersetzungsverhältnis zwischen Stator- und Läuferseite und  $k_M$  der Motorkonstanten.

Bild 2.9 zeigt das Zeigerdiagramm hinsichtlich der Orientierung am Statorstrom  $i_{sd}$  für den verlustoptimalen Betrieb. Daraus lässt sich ableiten, dass nachfolgende Frequenzbedingung für Statorstrom- und Läuferstromfrequenz ( $\omega_s$  und  $\omega_L$ ) stets eingehalten werden muss:

$$\omega_S = \omega_L + \omega_M = s \cdot \omega_S + \omega_M \quad (2.3)$$

Als Schlupf  $s$  wird dabei das Verhältnis aus Läufer- und Statorkreisfrequenz bezeichnet. Die mechanische Kreisfrequenz  $\omega_M$  ergibt sich wiederum aus der mechanischen Geschwindigkeit des Läufers  $v_M$  und der Polteilung  $\tau_p$ :

$$\omega_M = \frac{\pi}{\tau_p} \cdot v_M \quad (2.4)$$



**Bild 2.9** Zeigerdiagramm für den verlustoptimalen Betrieb mit statorfesten Koordinaten

### 2.3.2 Leistungübertragung für den doppelt gespeisten Linearmotor

Ausgehend vom stationären Betrieb des doppelt gespeisten Linearmotors ergeben sich die nachfolgenden Spannungsgleichungen für Stator und Läufer:

$$\underline{U}_S = R_S \cdot \underline{I}_S + j \cdot \omega_S \cdot L_{S\sigma} \cdot \underline{I}_S + j \cdot \omega_S \cdot L_h \cdot \underline{I}_S + j \cdot \omega_S \cdot L_h \cdot \underline{I}'_L \quad (2.5)$$

$$\frac{\underline{U}'_L}{s} = \frac{R'_L}{s} \cdot \underline{I}'_L + j \cdot \omega_S \cdot L'_{L\sigma} \cdot \underline{I}'_L + j \cdot \omega_S \cdot L_h \cdot \underline{I}'_L + j \cdot \omega_S \cdot L_h \cdot \underline{I}_S \quad (2.6)$$

In den beiden vorherigen Gleichungen sind die ohmschen Widerstände des Stator- und Läuferkreises ( $R_S$  und  $R_L$ ) sowie die Streuinduktivitäten  $L_{S\sigma}$  und  $L_{L\sigma}$  enthalten. Die mit einem Hochkomma versehenen Größen sind Größen der Läuferseite, die auf die Statorseite bezogen werden.

Wird der verlustoptimale Betrieb mit orthogonalen Stromkomponenten vorausgesetzt, so resultieren daraus die folgenden Spannungsgleichungen für die jeweiligen Komponenten in d, q-Koordinaten.  $L_S$  und  $L_L$  stellen dabei die Gesamtinduktivität des Stators bzw. des Läufers dar.

$$U_{Ld} = L_L \cdot \omega_L \cdot I_{Sd} \quad U_{Lq} = R_L \cdot I_{Lq} + \frac{L_h}{\ddot{u}} \cdot \omega_L \cdot I_{Sd} \quad (2.7)$$

$$U_{Sd} = R_S \cdot I_{Sd} - \frac{L_h}{\ddot{u}} \cdot \omega_S \cdot I_{Lq} \quad U_{Sq} = L_S \cdot \omega_S \cdot I_{Sd} \quad (2.8)$$

Durch Multiplikation mit dem Dreifachen des konjugiert komplexen Stromes ergeben sich die Wirkleistungsaufnahmen für Stator ( $P_S$ ) und Läufer ( $P_L$ ) sowie die Blindleistungen ( $Q_S$  bzw.  $Q_L$ ):

$$P_L = 3 \cdot U_{Lq} \cdot I_{Lq} = 3 \cdot R_L \cdot I_{Lq}^2 + 3 \cdot \frac{\omega_L \cdot L_h}{\ddot{u}} \cdot I_{Sd} \cdot I_{Lq} \quad (2.9)$$

$$Q_L = -3 \cdot U_{Ld} \cdot I_{Lq} = 3 \cdot \omega_L \cdot L_L \cdot I_{Lq}^2 \quad (2.10)$$

$$P_S = 3 \cdot U_{Sd} \cdot I_{Sd} = 3 \cdot R_S \cdot I_{Sd}^2 - 3 \cdot \frac{\omega_S \cdot L_h}{\ddot{u}} \cdot I_{Sd} \cdot I_{Lq} \quad (2.11)$$

$$Q_S = 3 \cdot U_{Sq} \cdot I_{Sd} = 3 \cdot \omega_S \cdot L_S \cdot I_{Sd}^2 \quad (2.12)$$

Wird nun die vom Läufer aufgenommene Wirkleistung  $P_B$  betrachtet, so wird Energie dann ins Bordnetz übertragen, wenn das Vorzeichen negativ ist:

$$P_B = -3 \cdot (R_L \cdot I_{Lq}^2 + \frac{\omega_L \cdot L_h}{\ddot{u}} \cdot I_{Sd} \cdot I_{Lq}) \quad (2.13)$$

Der erste Term aus Gl. 2.13 entspricht somit den ohmschen Verlusten im Läufer, während der zweite Term die über den Luftspalt übertragene Leistung darstellt.

Da die Schubkraft proportional zum Produkt der beiden Motorströme ist (vgl. Gl. 2.2), wird somit lediglich das Verhältnis von Stator- zu Läuferstrom festgelegt. Des Weiteren legt die Frequenzbedingung (vgl. Gl. 2.3) bei vorgegebener mechanischer Geschwindigkeit des Läufers  $v_M$  sowie eingestellter Statorfrequenz  $\omega_S$  die Läuferfrequenz  $\omega_L$  fest. Dementsprechend ist eine Leistungsübertragung ins Bordnetz nur an nachfolgende Bedingung geknüpft:

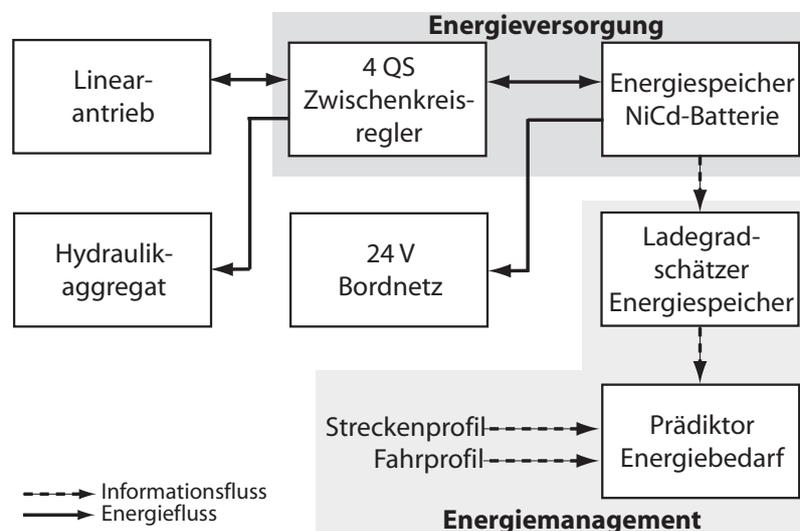
$$\omega_L > -\frac{\ddot{u} \cdot R_L}{L_h} \cdot \frac{I_{Lq}}{I_{Sd}} \quad (2.14)$$

Durch die Leistungselektronik bzw. die Motorelemente sind systembedingt Begrenzungen für beide Motorstromamplituden sowie für die Stromfrequenzen festgelegt. Wird die Gleichung nun ausgewertet, so ergibt sich daraus, dass bei Umkehr der Schubkraft, realisiert durch einen Vorzeichenwechsel des Läuferstromes, ebenso eine Umkehr der Läuferfrequenz resultieren muss, um die Bedingung einer Leistungsübertragung zu gewährleisten. Daraus folgt, dass bei treibender Kraft  $\omega_L > 0$  zu wählen ist, während bei bremsender

Kraft  $\omega_L < 0$  sein muss. Folglich wird eine Arbeitspunktsteuerung eingesetzt, um die Leistungsübertragung zwischen Läufer und Stator zu steuern. Diese Arbeitspunktsteuerung ist in [PBS+04] genau erläutert.

Da die Leistungsübertragung auch abhängig von der Schubkraftbildung ist und folglich nicht in jedem Arbeitspunkt genügend Energie ins Bordnetz übertragen werden kann, ist nach [LPF+04] ein Energieversorgungsmodul an Bord des RailCabs zwingend erforderlich.

Dieses Modul setzt sich maßgeblich aus einem Energiespeicher (NiCd-Batterie) und einem Gleichstromsteller zusammen. Der Gleichstromsteller realisiert dabei einen bidirektionalen Energiefluss zwischen Speicher und Gleichspannungszwischenkreis, an dem die Antriebswechselrichter angeschlossen sind. Zur Maximierung der Batterielebensdauer verfügt das Energieversorgungsmodul zudem über ein Energiemanagement, das die Energieflüsse steuert. So wird anhand des aktuellen Energiebedarfs und des aktuellen Ladegrads des Speichers ermittelt, wie viel Energie ins Bordnetz eingespeist werden soll. Zur Ermittlung des Speicherladegrads wird ein Ladegradschätzer eingesetzt [Pot06] (siehe Bild 2.10).

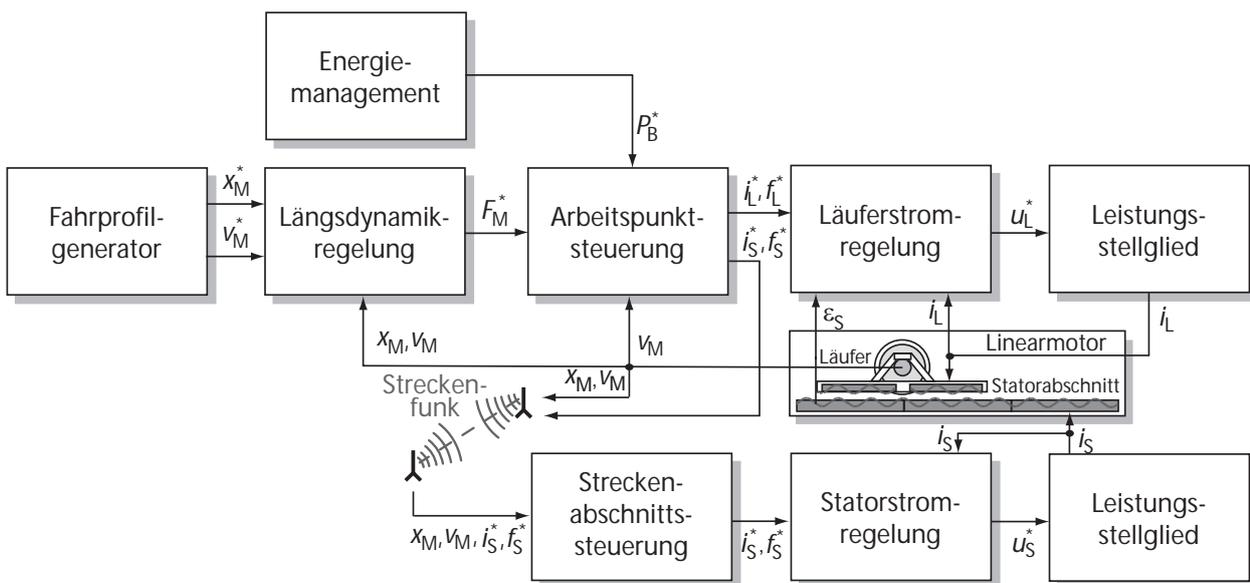


**Bild 2.10** Übersicht Bordnetz und Energiemanagement

### 2.3.3 Regelungsstruktur für den doppelt gespeisten Linearmotor

Beim doppelt gespeisten Linearmotor werden sowohl der entlang der Strecke zwischen den Schienen verlegte Stator als auch der auf den Fahrzeugen unterhalb des Fahrwerks montierte Läufer aktiv bestromt [Pot06]. Die Referenzwerte dieser beiden Motorkomponenten werden auf dem Bordrechner des RailCabs berechnet. Dazu wird neben der Sollschubkraft der Sollwert der zu übertragenden Leistung an die Arbeitspunktsteuerung ge-

geben. Diese berechnet daraus die erforderlichen Läufer- und Statorströme nach Amplitude und Frequenz. Aufgrund der zuvor beschriebenen örtlichen Trennung muss zur Einstellung der gewünschten Schubkraft und Leistungsübertragung ein möglichst schneller Datenaustausch zwischen den informationsverarbeitenden Systemen beider Motorkomponenten und folglich zwischen Fahrzeug und Strecke erfolgen, um auf beiden Teilsystemen zeitnah auf veränderliche Sollwerte reagieren zu können. Dies geschieht über eine drahtlose Kommunikationsverbindung. Die Aufschaltung der Sollwerte darf erst nach erfolgreicher Datenübertragung und zu einem definierten Zeitpunkt erfolgen, um ein Umschalten nicht zueinander passender Arbeitspunkte auszuschließen. Damit nicht permanent die gesamte Strecke bestromt wird, werden der streckenseitigen Informationsverarbeitung auch die jeweiligen Fahrzeugpositionen übermittelt. Eine Streckenabschnittssteuerung sorgt schließlich dafür, dass nur die jeweils benötigten Umrichter aktiviert werden. Die gesamte Regelungsstruktur eines RailCabs nach [Pot06] ist in Bild 2.11 dargestellt.



**Bild 2.11** Regelungsstruktur eines RailCabs nach [Pot06]

## 2.4 Modellierung von Fahrzeug und Umfeld

Eine Modellbildung von Fahrzeug und Umfeld ist erforderlich, um das Fahrverhalten der Schienenfahrzeuge untersuchen zu können. Dabei sind auch die auf das Fahrzeug wirkenden Störgrößen zu berücksichtigen. Ebenso ist auch eine Analyse des Fahrweges vorzunehmen, um schließlich ein Gesamtmodell zu erhalten.

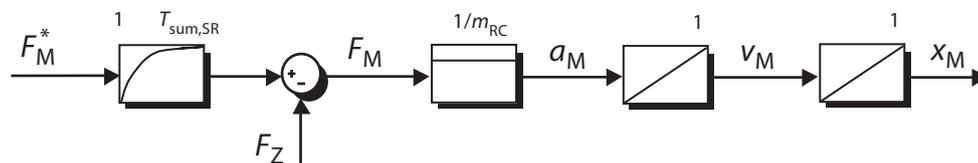
## Fahrzeugmodell

Das Fahrzeugmodell umfasst zuallererst den mechanischen Teil. Da bei den vorgestellten aktiv spurgeführten RailCabs nur die Längsdynamikregelung von Interesse ist und die Längsregelung quasi entkoppelt von der Querregelung des Fahrzeugs ist, wird das Fahrzeug als einfaches Einmassenmodell mit der Masse  $m_{RC}$  angenommen. Die Krafterzeugung erfolgt wie bereits beschrieben durch den doppelt gespeisten Linearmotor.

Da der Linearmotor des vorgestellten Schienenverkehrssystems stromeinprägend betrieben wird und über den gesamten Arbeitsbereich eine konstante Schubkraft erzeugt werden kann [Hen03], kann der Antrieb im regelungstechnischen Modell zu einem Verzögerungsglied erster Ordnung zusammengefasst werden mit der Summenzeitkonstante  $T_{sum,SR}$ . Wobei die Zeitkonstante einerseits durch die statistische Stromrichtertotzeit  $T_{tot,SR}$  und andererseits durch die elektrische Zeitkonstante des Linearmotors  $T_{LM}$  beschrieben wird:

$$T_{sum,SR} = T_{tot,SR} + T_{LM} \quad (2.15)$$

Die Regelstrecke für die Regelung der Fahrzeuglängsbewegung kann dann gemäß Bild 2.12 dargestellt werden.



**Bild 2.12** Regelstrecke Fahrzeuglängsbewegung

Unter Vernachlässigung des Störeinflusses ergibt sich für die dargestellte Regelstrecke folgende Führungsübertragungsfunktion:

$$G_S(s) = \frac{1}{1 + T_{sum,SR} \cdot s} \cdot \frac{1}{m_{RC}} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1/m_{RC}}{T_{sum,SR} \cdot s^3 + s^2} \quad (2.16)$$

Tatsächlich wirken auf das Fahrzeug aber auch Störeinflüsse ein. Als auftretende Störkräfte  $F_Z$  können Reibkräfte, die Luftwiderstandskraft sowie die Hangabtriebskraft identifiziert werden. Diese greifen innerhalb der Regelstrecke im Anschluss an die Stromregelung an.

## Analyse der Störgrößen

Für die Luftwiderstandskraft  $F_L$  gilt unter Berücksichtigung des Umgebungswindes folgende Gleichung:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_{Lu} \cdot c_w \cdot A_{Fr} \cdot (v_M + v_w)^2 \tag{2.17}$$

Für das Fahrzeug werden ein  $c_w$ -Wert von 0,4 und eine Querschnittsfläche  $A_{Fr}$  von  $1,44 \text{ m}^2$  angenommen [Pot06]. Wird neben der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit von  $10 \text{ m/s}$  noch eine Windgeschwindigkeit von  $2,5 \text{ m/s}$  angenommen, so ergeben sich daraus folgende Werte:

$$F_L = 56,16 \text{ N} \quad \text{ohne Berücksichtigung des Windes}$$

$$F_L = 87,75 \text{ N} \quad \text{mit Gegenwind von } 2,5 \text{ m/s}$$

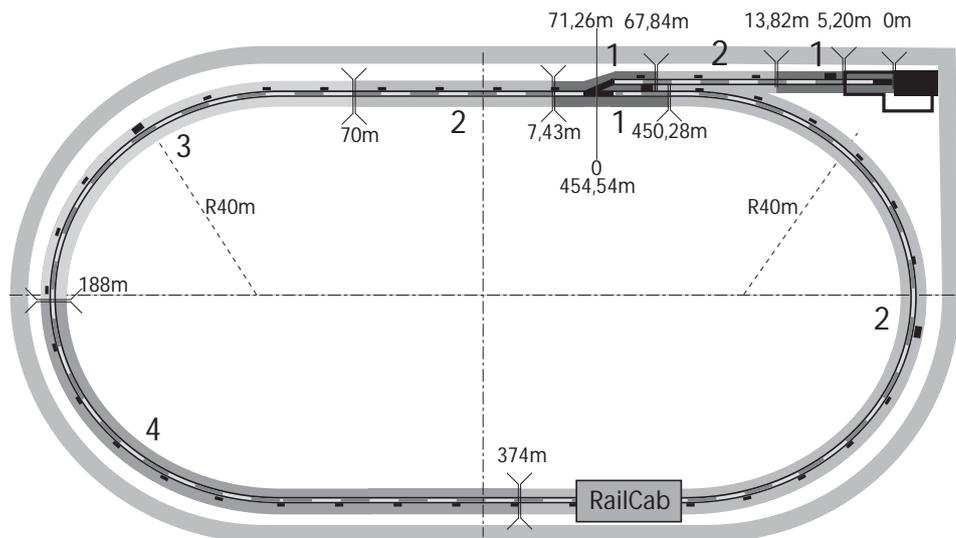
$$F_L = 31,59 \text{ N} \quad \text{mit Rückenwind von } 2,5 \text{ m/s}$$

Weiterer Bestandteil der Störkräfte ist die Reibung zwischen Rädern und Schiene. Dabei muss zwischen Rollreibung  $F_R$  und sporadischer auftretender Reibung durch Spurkranz-anläufe  $F_{SK}$  unterschieden werden. Für die Rollreibung gilt folgender Zusammenhang:

$$F_R = c_r \cdot m_{RC} \cdot g \cdot \cos \alpha \tag{2.18}$$

Da der Koeffizient  $c_R$  für die Reibung von Stahl auf Stahl sehr klein ist, beträgt die Reibkraft lediglich wenige Newton.

Das Anlaufen des Spurkranzes am Schienenrand wird zwar durch die aktive Spurführung weitestgehend vermieden, tritt aber dennoch aufgrund größerer Störungen gelegentlich auf und kann durch eine sporadisch auftretende Störgröße zumindest innerhalb der Simulationsumgebung modelliert werden.



**Bild 2.13**      **Abschnittunterteilung der Versuchsanlage nach [Pot06]**

Neben diesen Störgrößen existiert noch die Hangabtriebskraft, die durch den Neigungswinkel  $\alpha$  der Schienenstrecke beeinflusst wird. Es gilt folgende Gleichung:

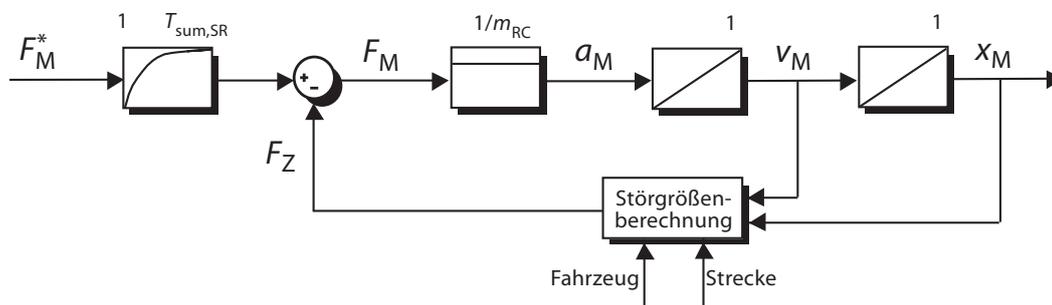
$$F_H = m_{RC} \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2.19)$$

Die Werte der Hangabtriebskraft können gemäß Bild 2.13 entsprechend der Streckentopologie abschnittsweise definiert werden. In Tab. 2.2 sind die resultierenden maximalen Beschleunigungswerte  $a_{M,max}$  für ein RailCab mit einem Gewicht von 1250 kg dargestellt.

**Tabelle 2.2 Beschleunigung eines RailCabs (mit:  $m_{RC} = 1250$  kg)**

Abschnitt $i$	1	2	3 aufwärts	3 abwärts	4 aufwärts	4 abwärts
$a_{M,max}$ in $m/s^2$	0.3	0.9	0.6	1.4	0.8	1.2

Die auftretenden Störkräfte können anhand der Positions- und Geschwindigkeitsdaten berechnet werden. Dazu werden neben den Streckendaten auch Fahrzeugdaten benötigt. Dies geschieht mittels eines Berechnungsblocks, der im Rückkopplungszweig angeordnet ist (siehe Bild 2.14).



**Bild 2.14 Modell des Gesamtsystems**

## 2.5 Vergleich mit dem Stand der Technik

Es ist bislang kein weiteres Transportsystem bekannt, das die zuvor genannten Kerneigenschaften des RailCab-Systems (Linearantrieb; abstandsgeregelte Schienenfahrzeuge; autonom agierende und kooperierende Systeme) allesamt aufweist. Allerdings gibt es aus unterschiedlichen Fahrzeugbereichen Anwendungen, die zumindest teilweise den RailCab-Technologien ähneln. In den folgenden Betrachtungen des Stands der Technik wird hinsichtlich der Systemeigenschaften differenziert. Zudem werden die Vor- und Nachteile diskutiert.

## 2.5.1 Transportsysteme und Technologien

### Personal Rapid Transit (PRT)

Unter dem Begriff Personal Rapid Transit werden öffentliche Transportmittel verstanden, die folgende Eigenschaften aufweisen [CVH+07], [And01]:

- Kleine, fahrerlose Fahrzeuge mit 3-5 Fahrgastplätzen,
- Betrieb ohne festen Fahrplan nach Bedarf der Passagiere,
- Direkte Verbindungen ohne Umsteigen auf kürzestem Weg,
- Exklusive Benutzung der voll vernetzten Schienenwege,
- Netzunabhängige Bahnstationen an Nebengleisen.

Diese Art von Transport stellt folglich eine Mischform aus Individualverkehr und Massentransportmittel dar. Eine ausreichende Transportkapazität, die in etwa vergleichbar mit der von Bussen oder Straßen- bzw. U-Bahnen ist, erfordert einen Betrieb der Fahrzeuge im Takt von wenigen Sekunden. Dies stellt hohe Anforderungen an die Systemicherheit. Infolge eines Fahrzeugausfalls müssen z.B. alle nachfolgenden Fahrzeuge selbsttätig und rechtzeitig stoppen können. Ein Kennzeichen dieser Transportsysteme ist daher ein hoher Automatisierungsgrad.

Beispiel hierfür ist das ULTra-System (Urban Light Transport) [Ult12] (Bild 2.15 a), welches am Londoner Flughafen Heathrow betrieben wird. Ebenso wie das in den Vereinigten Arabischen Emiraten entstehende System Masdar City PRT [Mas12] werden die Fahrzeuge mit Gummireifen ausgestattet und auf Asphalt oder Beton in separaten Spuren betrieben. Das System Vectus PRT [Vec12] (Bild 2.15 b) in Schweden hingegen ist ein schienengebundenes System, das zudem auch mit einem Linearmotor angetrieben wird.



**Bild 2.15** a) Ultra PRT [Ult12]

b) Vectus PRT [Vec12]

Um einen hohen Durchsatz zu erzielen, werden die Fahrzeuge mit von der Fahrgeschwindigkeit abhängigen Abständen nach dem mobilen Blockverfahren betrieben. Eine

Abstandsregelung zwischen Fahrzeugen wie bei den RailCabs ist hier jedoch nicht vorgesehen. Dies führt insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten im Vergleich zu den RailCabs zu einem größeren Energiebedarf. PRT-Systeme werden daher vorwiegend für geringere Geschwindigkeiten ausgelegt.

### **Group Rapid Transit (GRT)**

Die Eigenschaften von Group Rapid Transit (GRT) oder Passenger Transport Systemen (PTS) [Irv78] sind denen von PRT-Systemen sehr ähnlich. Allerdings sind die Fahrzeuge nicht ausschließlich für den Individualverkehr vorgesehen. Die Fahrzeugeinheiten sind etwas größer als beim PRT und werden mit einem Fassungsvermögen von bis zu 12 Personen angegeben. Der Transport findet daher nicht zwangsläufig auf direktem Wege ohne jeden Zwischenhalt statt. Als Beispiele derartiger Anwendungen sind die Systeme Park Shuttle [Par12] oder AUSTRANS [Aus12] zu nennen.

Die Eigenschaften des RailCabs kommen daher den GRT-Systemen nahe. Der Fahrzeug-einsatz bei GRT-Systemen erfolgt jedoch nicht nach Fahrplan, sondern nach Bedarf von kleinen Gruppen. Einsatzgebiet dieses Transportmittels sind beispielsweise Flughafenbereiche, um einen zügigen Betrieb zwischen Terminals oder eine flexible Verbindung zwischen Flughafen und Innenstadt zu erzielen. Das Betreiben von ungekoppelten Fahrzeugverbänden ist bei den bisher bekannten GRT-Systemen nicht von Bedeutung.

### **Abstandshalte- und Zugsicherungsverfahren im Schienenverkehr**

Es existieren unterschiedliche Verfahren zur Abstandhaltung im klassischen Schienenverkehr. Für das Fahren im relativen Bremswegabstand werden die Bremswege beider Fahrzeuge herangezogen. Im Idealfall kann so ein minimaler Abstand erreicht werden. Im Gegensatz dazu steht der absolute Bremswegabstand, bei dem vor jedem Fahrzeug die Länge seines absoluten Bremsweges freigehalten wird. Dieses Verfahren wird auch als mobiler Block (Dynamic Moving Block) [Sch07] bezeichnet. Möglich ist aber auch das Fahren im festen Raumabstand. Dies ist das Standardverfahren der Zugfolgesicherung und ist gekennzeichnet durch ortsfeste Signalisierung und feststehende Blockeinteilung. In jedem Block darf sich nur ein einziger Zug aufhalten. Die Einfahrt in einen Block ist nur dann erlaubt, wenn der Block freigegeben ist. Ein im absoluten Bremsweg angeordnetes Vorsignal zeigt den Zustand des Hauptsignals, das die Blockfreigabe angibt. Ein weiteres eingesetztes Verfahren bei der Bahn ist das Fahren im Sichtabstand, das allerdings nur bei geringen Geschwindigkeiten zum Einsatz kommt.

Die Zusicherungsverfahren unterscheiden sich nach kontinuierlicher und diskontinuierlicher Ortsüberwachung [NP04]. Bei der kontinuierlichen Überwachung erhält das übergeordnete Leitsystem zu jeder Zeit Informationen, so dass das Fahren im relativen Bremswegabstand möglich ist. Bekannte Verfahren sind hier die linienförmige Zugbeeinflussung (LZB) und die Funk-Zug-Beeinflussung (FZB). Ein weiteres Verfahren ist der Funk-Fahrbetrieb (FFB) bei dem von der konventionellen zentralen Fahrwegsteuerung Abkehr genommen wird und die Steuerung der Fahrwegelemente (Weichen und Bahnübergänge) auf die Züge übertragen wird. Ebenso sind die Fahrzeugortung sowie die Überprüfung der Zugintegrität eigenständig durchzuführen. Für die Kommunikation wurde der Standard GSM-R (Global System for Mobile Communication – Railway) eingeführt.

Bei der diskontinuierlichen Ortsüberwachung werden nur an festen Orten Informationen über den Zug erzeugt. Bekannte Verfahren sind dabei die induktive Zugsicherung (InduSi) und der satellitengestützte Zugsicherung (SatZB).

Das European Train Control System (ETCS) vereinheitlicht die Leit- und Sicherungssysteme in Europa. ETCS Level 1 basiert auf punktförmiger Zugbeeinflussung, da es von der sogenannten Eurobalise Informationen über die Stellung der ortsfesten Signalanlagen bekommt. Bei ETCS Level 2 entfallen jedoch die Balisen, da über GSM-R vom Radio Block Center ein statisches Geschwindigkeitsprofil an den Zug übertragen wird. Anhand dieses Geschwindigkeitsprofils sowie zugspezifischer Parameter wird ein dynamisches Fahrprofil berechnet. Gleisfreimeldungen werden durch streckenseitige Einrichtungen wie Gleichstromkreise oder Achszähler realisiert. Dieses Verfahren kommt daher der Funk-Zug-Beeinflussung nahe. ETCS Level 3 sieht hingegen streckenseitig lediglich noch Balisen zur Grobortung der Fahrzeuge vor. Die Fahrzeuge müssen dann eigenständig ihre Positionsbestimmung sowie Vollständigkeitsüberprüfung durchführen. Wichtiges Kennzeichen des ETCS-Systems ist die Abwärtskompatibilität der Systemstufen [Boc01].

Das Fahren im relativen Bremswegabstand ohne Berücksichtigung zusätzlicher Sicherheitsabstände ist im Schienenverkehr bislang gänzlich unbekannt. Mit neuen Standards und Technologien (wie z.B. ETCS) wird versucht, kürzere Zugfolgeabstände zu realisieren. Fahren im Abstand von wenigen Metern ist dabei jedoch nicht von Bedeutung.

## Führerloses Fahren

Vollautomatische fahrerlose Bahnsysteme werden vor allem im Personentransport bei Stadtschnellbahnen (S-Bahn, U-Bahn, Stadtbahn) in Ballungsräumen angewendet, da dort aufgrund des hohen Transportaufkommens viele Fahrzeuge betrieben werden. Unter dem Oberbegriff Automatic Train Operation (ATO) werden Module wie z.B. Automatic Train Control (ATC) oder Automatic Train Protection (ATP) unterschieden [Pac08]. ATC ist der automatisierte Fahrbetrieb, bei dem ein Fahrrechner Funktionen, wie z.B. die Geschwindigkeitssteuerung, ausführt. Im Fokus von ATC steht aber auch eine Überwachung der Zu- und Ausstiege, die ein Sicherheitsrisiko darstellen können. Sicherheitsrelevante Vorgänge der Zugbeeinflussung werden vom Modul ATP ausgeführt. Dieses Modul überwacht das Fahrzeug und hat einen direkten Zugriff auf die Bremse. Auf diese Weise kann ein Fehlverhalten der zentralen Leitstelle oder des Bedienpersonals erkannt werden.

Vollautomatisierte Bahnen verfügen über eine zentrale Leit- und Steuerungstechnik. Die Regelung der Fahrdynamik findet auf den Fahrzeugen statt, während die Fahr- und Stellbefehle per Funk an die Fahrzeuge übertragen werden. Die Zugsicherung erfolgt vorwiegend nach bekannten Zugsicherungsverfahren. Als Beispiel kann hier die führerlose U-Bahn RUBIN in Nürnberg genannt werden (Bild 2.16 a). Weitere Projekte sind aber auch aus dem Bereich des vollautomatischen Güterverkehrs bekannt, wie z.B. FlexCargoRail [BDF+09]. Die Fahrzeuge können sich anhand einer Umfelderkennung und einer intelligenten Steuerung selbst koordinieren und eigenständig Fahraufträge erteilen. Eine Einfahrt auf Durchgangstrecken ist hierbei jedoch nicht vorgesehen.



**Bild 2.16** a) U-Bahn RUBIN  
Nürnberg [Sie11]

b) AGV im Container Terminal  
Altenwerder (CTA) [Got12]

Neben diesen Systemen existieren weitere, die auch ein eigenständiges Navigieren der Fahrzeugmodule vorsehen. So gibt es beispielsweise Automated Guided Vehicles (AGV)

von der Firma Gottwald [Got12] (Bild 2.16 b), die sich selbst navigieren und steuern können. Anwendungsgebiet sind hier beispielsweise Hafenanlagen, in denen die Fahrzeuge Container vom Schiff zu einem Hub transportieren.

In den zuvor genannten Projekten findet keine Kooperation zwischen den Fahrzeugen statt. Jedes Fahrzeug erhält seinen eigenen Fahrauftrag und arbeitet diesen ab. Es wird daher ein gewisser Arbeitsraum definiert, der ausschließlich einem einzigen Fahrzeug zur Verfügung steht. Ein kooperierender Betrieb – wie im Falle der Konvoifahrt mit geringen Abständen – wird nicht vorgesehen.

## 2.5.2 Elektrische Antriebe und Energieversorgung

### Linearantriebstechnik und Energieversorgung im Bahnbereich

In der Bahntechnik existiert mittlerweile eine Reihe von Forschungsprojekten und auch kommerziell genutzten Anwendungen, die mit Linearantriebstechnik versehen sind. Zu unterscheiden sind hierbei im wesentlichen Langstator- und Kurzstatorsysteme.

Langstatorsysteme: Wird der Motor synchron betrieben, so bewegen sich alle Fahrzeuge automatisch synchron mit der Wanderwelle im Stator. Folglich ist systembedingt kein dynamisches Zusammenfügen von Fahrzeugen während der Fahrt möglich. Zudem kann keine berührungslose Leistungsübertragung erfolgen. Als Beispiel sei hier der Transrapid (Bild 2.17 a) genannt, dessen elektrischer Energiebedarf weitestgehend über in die Pole der Tragschienen integrierte Lineargeneratoren gedeckt wird.

Kurzstatorsysteme: Bei Kurzstatorsystemen ist der aktive Teil des Motors auf dem Fahrzeug untergebracht. Durch die separate Speisung der Läufer auf den einzelnen Fahrzeugen ist eine Konvoibildung möglich. Da der streckenseitige Teil des Motors passiv ausgeführt ist, kann keine Energie übertragen werden. Es existieren mittlerweile zahlreiche Bahnen, die mit einem Kurzschlussläufer-Linearmotor angetrieben werden. Diese Technologie wird z.B. von der Firma Bombardier unter der Bezeichnung Advanced Rapid Transit (ART) in Vancouver, Toronto, Tokio, Detroit, New York, Peking und Kuala Lumpur eingesetzt [Bom12b] (Bild 2.17 b). Ebenso werden von der Firma Hitachi derartige Systeme vertrieben, die in U-Bahnen aufgrund der flacheren Bauweise der Fahrzeuge sowie der besseren Steigfähigkeit Anwendung finden, wodurch sich die Streckenbaukosten reduzieren lassen. Bei diesen Anwendungen wird jeweils eine Stromschiene oder eine Oberleitung zur Energieversorgung der Fahrzeuge eingesetzt [Hit12].

## Berührungslose Leistungsübertragung und Energiemanagementsysteme

Techniken zur berührungslosen Leistungsübertragung werden eingesetzt, um Fahrzeuge während des Betriebs mit Energie zu versorgen, z.B. in kleinen Transportfahrzeugen in Fabrikationsanlagen oder Logistikunternehmen. Es gibt auch bereits Anwendungen von den Firmen Alstom und Bombardier für Straßenbahnanwendungen, bei denen ein Einsatz von Oberleitungen unerwünscht ist. Das System PRIMOVE von Bombardier [Bom12a] wird mittels höherfrequenter induktiver Leistungsübertragung über im Fahrweg verlegte Kabel und unterhalb der Fahrzeuge angebrachte Aufnahmespulen realisiert. In Kombination mit dem System MITRAC Energy Saver [Bom12a] können durch die Speicherung von Bremsenergie in leistungsstarken Doppelschichtkondensatoren Passagen ohne externe Energiezufuhr überfahren werden. Zudem können durch ein intelligentes Energiemanagement die Energieflüsse zwischen Motor, Energiespeicher und Einspeisung optimiert und somit Energiekosten reduziert werden. Ein ähnliches System ist das APS-System von der Firma Alstom, das in der Straßenbahn in Bordeaux bereits seit 2003 eingesetzt wird [Als12]. Schienenfahrzeuge mit doppelt gespeistem Linearmotor, bei denen die Energieversorgung wie beim RailCab über den Linearmotor erfolgt, sind nicht bekannt.



**Bild 2.17** a) Transrapid in Shanghai [Tra12]

b) Skytrain Vancouver [Sky12]

### 2.5.3 Verteilte autonome Systeme

#### Anwendungen autonomer, abstandsgeregelter Fahrzeuge

Bisherige Untersuchungen auf dem Gebiet abstandsgeregelter Fahrzeuge beschränken sich fast ausschließlich auf den Automobilbereich. Aus den USA sind die Großprojekte IVHS (Intelligent Vehicle Highway System) und PATH (Partners for Advanced Transit und Highways) [May01] bekannt. Ziel der beiden Projekte ist es, durch die Einführung

neuartiger Technologien eine automatische Abstandshaltung hinsichtlich der Längsführung von Straßenfahrzeugen zu realisieren. Zudem wird auch die automatische Spurhaltung in Querrichtung untersucht.

Ein wesentlicher Aspekt im Projekt PATH ist, dass sich einzelne Fahrzeuge auf einer automatischen Fahrspur zu Kolonnen zusammenfügen, wobei der Abstand zwischen den Fahrzeugen unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit und zudem sehr gering ist. Geringe Abstände führen wiederum dazu, dass sich zwischen den Fahrzeugen eine geringe Differenzgeschwindigkeit ergibt, was im Falle einer Kollision wiederum zu sehr begrenzten Schäden führen würde. Zusammenstöße müssen zwar generell vermieden werden, können aber bei eklatanten Fehlfunktionen nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Die Abstände zwischen einzelnen Kolonnen sind wiederum entsprechend den üblichen Sicherheitsvorschriften zu wählen.

Ein Verfahren aus der Automobiltechnik ist Adaptive Cruise Control (ACC). Dort liegt der Fokus im Bereich abstandsgeregelter Tempomaten [KD05], [RS06]. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Fahrspurkapazitäten zu steigern, den Energiebedarf der Fahrzeuge zu senken und die Sicherheit zu erhöhen. Ein autonomer Betrieb der Kraftfahrzeuge ist hierbei nicht vorgesehen. Der Fahrer soll lediglich entlastet werden, indem er Aufgaben wie Abstands- und Spurhaltung nicht mehr wahrnehmen muss. Dabei spielen moderne regelungstechnische Ansätze, wie z.B. modell-prädiktive Verfahren, zur genauen Abstandshaltung eine große Rolle [Zam05], um auf Einflüsse und Risiken, die aus menschlichem Handeln resultieren, optimal reagieren zu können.

Das Intelligent Community Vehicle System (ICVS) von der Firma Honda ist ähnlich dem IVHS. Es zielt jedoch nicht nur auf lose organisierte Fahrzeugverbände ab und sieht auch vor, einzelne Fahrspuren zu reservieren und diese ausschließlich mit vernetzten Fahrzeugen zu nutzen, so dass dort schneller gefahren werden kann.

Weitere Projekte beschäftigen sich mit autonom agierenden Fahrzeugen, die neben der Umfeldüberwachung auch die Generierung von Fahrbefehlen in Störfällen und ein kooperatives Agieren von Fahrzeugen im Kreuzungsbereich untersuchen. Ein wichtiges Forschungsprojekt ist der SFB/TR 28 – Kognitive Automobile (Karlsruhe und München). Dieses befasst sich mit mobilen Systemen, die eigenständig in ihrem Umfeld agieren und miteinander kooperieren können. Dazu werden Methoden zur Situationsidentifikation sowie zur Prädiktion zukünftiger Systemzustände entwickelt, um eine wissensbasierte Verhaltensadaption ausführen zu können. Neben diesen Forschungsschwerpunkten stellt auch die Entwicklung einer Automobilplattform bestehend aus Fahrdynamikregelung

sowie der benötigten Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation einen Schwerpunkt dar [Sti06]. Ein dynamisches Zusammenfügen und Auflösen von Fahrzeugen sowohl an Kreuzungspunkten als auch auf freien Strecken, was in dieser Arbeit jedoch im Fokus steht, wird dort nicht betrachtet.

Weitere Arbeiten im Bereich der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation beschäftigen sich derzeit hauptsächlich mit der technischen Umsetzbarkeit der Kommunikationsnetzwerke [OM07] sowie der Verkehrsflussbeobachtung und Verkehrsflusserhaltung [Ton06]. Im Schienenverkehr aufkommende Zugbeeinflussungssysteme wie z.B. ETCS nutzen Funktechnik (GSM-R), dienen aber lediglich als Zugsicherungs- und Zugsteuerungssystem. Die Funkdaten fließen nicht unter Echtzeitbedingungen in die Regelung ein [Sch07].

### **Digital vernetzte Automatisierungssysteme**

Derzeit existiert das DFG-Schwerpunktprogramm 1305 – Regelungstheorie digital vernetzter dynamischer Systeme. Dort werden digital vernetzte dynamische Systeme untersucht, bei denen unterschiedliche Komponenten wie Sensoren, Aktoren, zu regelnde Teilsysteme sowie Regler durch ein digitales Kommunikationsnetz miteinander verbunden sind und gemeinsam eine Regelaufgabe ausführen [DFG12]. Die Projekte fokussieren weitgehend ereignisgesteuerte Kommunikationsabläufe, strukturvariable Netzwerke (ad-hoc Netzwerke) und unsichere Netzwerkeigenschaften. Einige innerhalb des DFG-Programms entwickelte Ansätze werden in der vorliegenden Arbeit in Kap. 5 angewendet.

Zur Fehleranalyse in großen, räumlich verteilten Systemen existiert eine Reihe von Arbeiten, die sich mit automatischer Erkennung von Fehlern und Fehleranalyseverfahren befassen. In dieser Arbeit werden Ansätze aus dem Verkehrs- und Automatisierungsbereich aufgegriffen, die zur Erstellung von Fehlerbäumen und Gefahrenlisten [DM07] dienen. Zudem werden Verfahren zur Fehleranalyse in drahtlos vernetzten Systemen [HL08] untersucht.

#### **2.5.4 Alleinstellungsmerkmale des Schienenverkehrssystems RailCab**

Systeme, bei denen sich Fahrzeuge während der Fahrt zu berührungslosen Konvois zusammenschließen können, werden derzeit lediglich im Straßenverkehrsbereich entwickelt. Die Anwendung auf schienengebundene Fahrzeuge stellt somit ein Alleinstellungsmerkmal des RailCabs dar.

Da bei den bisherigen Projekten im Straßenverkehr keine direkte Verkoppelung der Fahrzeugaktorik existiert und auch die informationstechnische Verkopplung wenn überhaupt nur schwach ausgeprägt ist, wird dort lediglich die Abstandsregelung untersucht. Zudem werden im Automobilbereich bislang keine Ansätze zur übergeordneten Planung des Energiemanagements, welche auch die Anordnung von Fahrzeugen in Konvois umfasst, verfolgt. Die Untersuchung von Fahrzeugen mit streckenseitig verkoppeltem Motorteil, die neben der Abstandsregelung auch ein fahrzeugübergreifendes Energiemanagement erfordert, ist jedoch beim Transportsystem RailCab von besonderer Bedeutung.



### **3. Betriebsleit- und Sicherungstechnik**

Die zuvor in Kap. 2 beschriebenen Eigenschaften des RailCab-Systems stellen hohe Anforderungen an die Betriebsleit- und Sicherungstechnik. Der autonome Betrieb der Fahrzeuge erfordert Koordinations- und auch Sicherungsfunktionen, insbesondere bei der Konvoifahrt. Der doppelt gespeiste Linearmotor stellt zudem ein örtlich verteiltes System dar. Folglich müssen zwischen den Systemkomponenten des Linearmotors sowie zwischen den Fahrzeugen Datenkommunikationskanäle realisiert werden.

In diesem Kapitel werden zunächst der Aufbau der Betriebsleittechnik auf der Versuchsanlage mit ihren unterschiedlichen Kommunikationskanälen und der Aufbau der Informationsverarbeitung erläutert. Fokussiert werden vor allem die Kommunikations- und Leittechniken, die für den autonomen Konvoibetrieb erforderlich sind. Zudem wird die Positionsbestimmung der Fahrzeuge auf der Strecke dargestellt und ein Überblick über die installierte Sicherungstechnik gegeben.

#### **3.1 Betriebsleittechnik für den autonomen Fahrbetrieb**

Die betriebsleittechnischen Einrichtungen müssen folgende Funktionen umfassen:

- Informationsverarbeitung der lokalen Systeme (RailCab, Streckensteuerung, Leitzentrale),
- Kommunikation zwischen RailCab und Streckensteuerung,
- Kommunikation zwischen verschiedenen RailCabs,
- Kommunikation zwischen RailCab und Leitzentrale,
- Kommunikation zwischen Streckensteuerung und Statorabschnitten.

Während die Informationsverarbeitung der jeweiligen Systembausteine obligatorisch ist, sind die einzelnen Kommunikationskanäle in die Regelfunktionen oder auch in die Koordinationsstruktur eingebunden. Auch die Sicherungstechnik basiert wesentlich auf diesen Kommunikationskanälen und verlangt nach weiteren Informationen zur Gewährleistung von Betriebs- und Ausfallsicherheit. Die einzelnen Kommunikationskanäle sowie der dazugehörige Datenaustausch sind in Tab. 3.1 aufgelistet.

Hinsichtlich der Kommunikationskanäle muss zudem noch differenziert werden, auf welcher Systemebene die Kommunikation abläuft. Wie in Kap. 2 bereits beschrieben, findet eine Kommunikation auf allen Ebenen der OCM-Systemstruktur statt, so dass unterschiedliche Anforderungen an die Kommunikationskanäle gestellt werden. Es ist dabei zu unterscheiden, ob die Kommunikation auf Controller-Ebene erfolgt, also unter Echtzeitbedingungen stattfinden muss, oder auf reflektorischer oder kognitiver Ebene abläuft.

**Tabelle 3.1 Kommunikationskanäle und Datenaustausch**

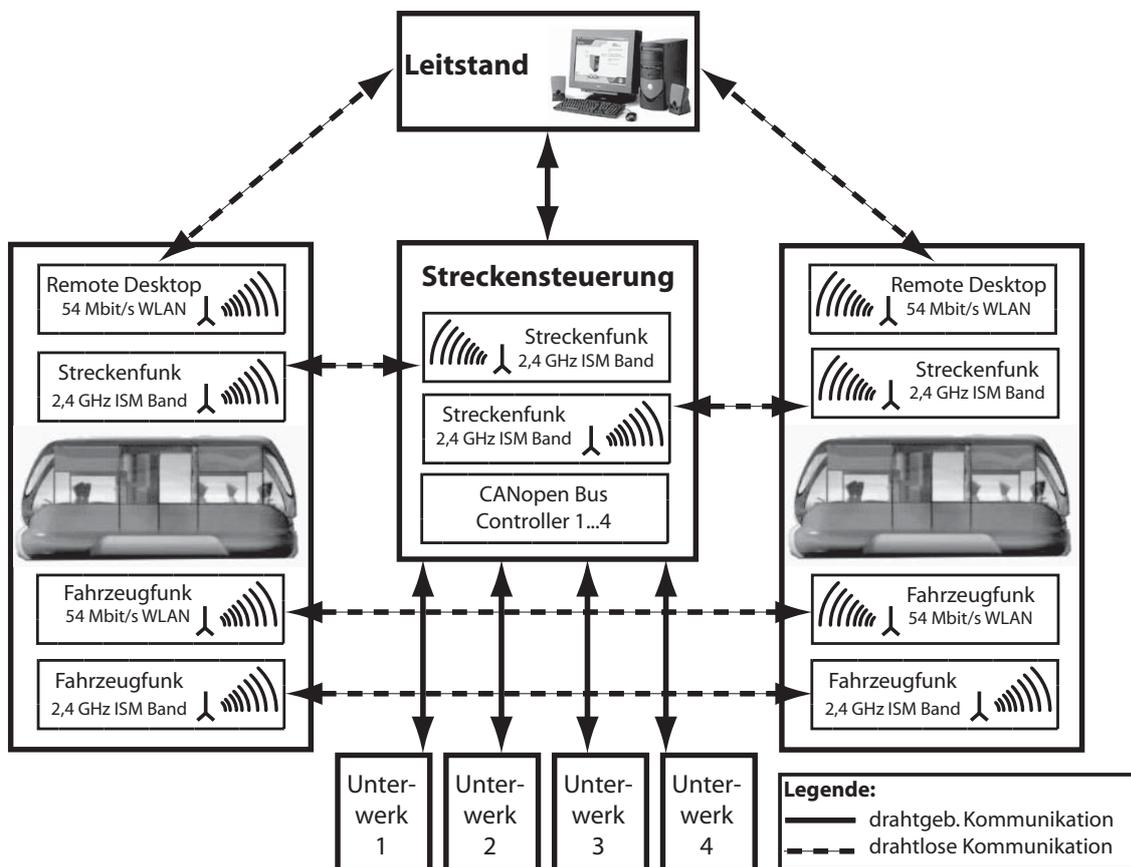
<b>Kommunikation RailCab ↔ Streckensteuerung</b>	
<b>Fahrzeug → Strecke</b>	<b>Strecke → Fahrzeug</b>
Statorsollwerte	Status-/Störfallmeldungen
Position	
Status-/Störfallmeldungen	
<b>Kommunikation RailCab ↔ RailCab</b>	
Fahrdaten, Statorsollwerte	
Status-/Störfallmeldungen	
Konvoikoordination	
<b>Kommunikation RailCab ↔ Leitzentrale</b>	
<b>Leitzentrale → Fahrzeug</b>	<b>Fahrzeug → Leitzentrale</b>
Fahrbefehle	Istwerte
	Status-/Störfallmeldungen
<b>Kommunikation Streckensteuerung ↔ Statorabschnitte</b>	
<b>Streckensteuerung → Statorabschnitte</b>	<b>Statorabschnitte → Streckensteuerung</b>
Statorsollwerte	Störfallmeldungen
Ein- und Ausschaltbefehle	

Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Streckensteuerung dient dem Austausch der Sollwerte des Stators sowie einer Sicherheitsfunktion. Zwischen den RailCabs finden zwei unterschiedliche Kommunikationsarten statt: Ein Kommunikationskanal befindet sich auf Controller-Ebene, um beispielsweise Positionsdaten für die Abstandsregelung sowie Motordaten für die Arbeitspunktsteuerung im Konvoibetrieb auszutauschen. Ein

weiterer Kommunikationskanal ist der reflektorischen OCM-Ebene zuzuordnen und dient der Organisation und Koordination von Fahrmanövern. Die Fahrzeuge werden aus einer zentralen Leitstelle überwacht und angesteuert. Daher ist eine Kommunikation zwischen dieser Leitzentrale und den Fahrzeugen erforderlich, die dem Anspruch genügen muss, jederzeit einen Zugriff zu ermöglichen. Um die gerade benötigten Statorabschnitte aktivieren zu können, wird entlang der Strecke ein weiterer Kommunikationspfad benötigt.

### 3.1.1 Implementierung an der Versuchsanlage

Bild 3.1 zeigt eine Übersicht der Betriebsleittechnik der Versuchsanlage der Neuen Bahntechnik Paderborn. Der prinzipielle Aufbau der Leittechnik ist für den Betrieb eines einzelnen RailCabs auf der Versuchsanlage bereits in [Pot06] dargestellt.



**Bild 3.1 Betriebsleittechnik an der Versuchsanlage**

Der Fahrzeugbetrieb und damit die Steuerung der Anlage erfolgt von einem zentralen Leitstand aus. Dazu kann per Remote-Desktop-Verbindung auf die Fahrzeugrechner zugegriffen werden. Die Kommunikation zwischen RailCab und Strecke erfolgt über einen weiteren Funkkanal, der unter Echtzeitbedingungen in die Fahrzeugregelung eingebunden ist [Pot06]. Wiederum über einen weiteren Kommunikationskanal geschieht das

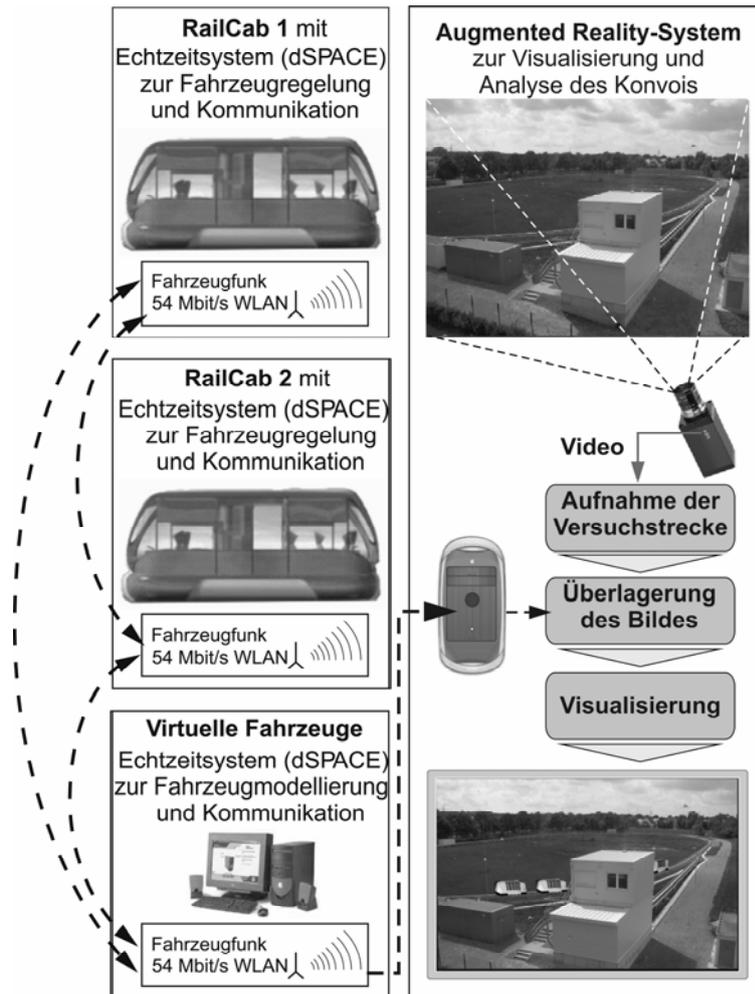
Aushandeln der Arbeitspunkte (Amplituden und Frequenzen von Stator- und Läuferstrom) der Linearmotoren zwischen den Fahrzeugen im Konvoibetrieb. Dies hat ebenfalls unter Echtzeit zu erfolgen. Neben dieser Funkverbindung existiert eine zusätzliche drahtlose Kommunikationseinrichtung zwischen den Fahrzeugen, die mittels Ethernet und UDP/IP-Protokoll zur Fahrzeugkoordination genutzt wird. Die Kommunikation zwischen der Streckensteuerung und den Unterwerken (Einspeisestationen für die Statorabschnitte) ist mittels eines CANopen-Busses realisiert. Eine detaillierte Beschreibung der Kommunikationskanäle erfolgt in Kap. 3.2.

### **Systemerweiterung zur verteilten Konvoisimulation**

Eine Erweiterung des zuvor beschriebenen Systems bietet weitere Möglichkeiten für realitätsnahe Untersuchungen des Konvoiverhaltens. Hieraus resultiert eine Hardware-in-the-Loop-Testumgebung (HiL) zur verteilten Konvoisimulation in Verbindung mit einer Augmented-Reality-Anwendung [RWH08]. Dazu wurden folgende Komponenten hinzugefügt (siehe Bild 3.2):

- Es wird weiterer Industrie-PC mit echtzeitfähiger Prototyping-Hardware eingesetzt. Auf diesem Rechner können zusätzliche Fahrzeugmodelle hinterlegt und folglich simuliert werden.
- Der Rechner wird über entsprechende Funkhardware in die Betriebsleittechnik der Versuchsanlage eingliedert.
- Ein Visualisierungssystem dient zur Darstellung dieser Fahrzeugmodelle in einer Virtual- und Augmented-Reality Umgebung.

Die Versuchsstrecke wird dabei von einer Kamera aufgenommen. Neben den realen Versuchsfahrzeugen werden dann weitere simulierte Fahrzeuge in das reale Bild eingeblendet (vgl. Kap. 2.2.4). Mit Hilfe dieser Erweiterungen kann das Verhalten auch längerer Fahrzeugkonvois untersucht werden [RH07]. Der Datenaustausch zwischen den Systemen erfolgt in diesem Fall über die bereits erwähnte UDP/IP-Verbindung, die in Kap. 3.2 detailliert beschrieben wird. Alle Fahrzeug- und Konvoidaten werden dabei auf einem weiteren Systemrechner gebündelt und an die Augmented-Reality-Anwendung übertragen.



**Bild 3.2** HiL-Prüfstand mit Augmented-Reality-Anwendung zur verteilten Konvoisimulation

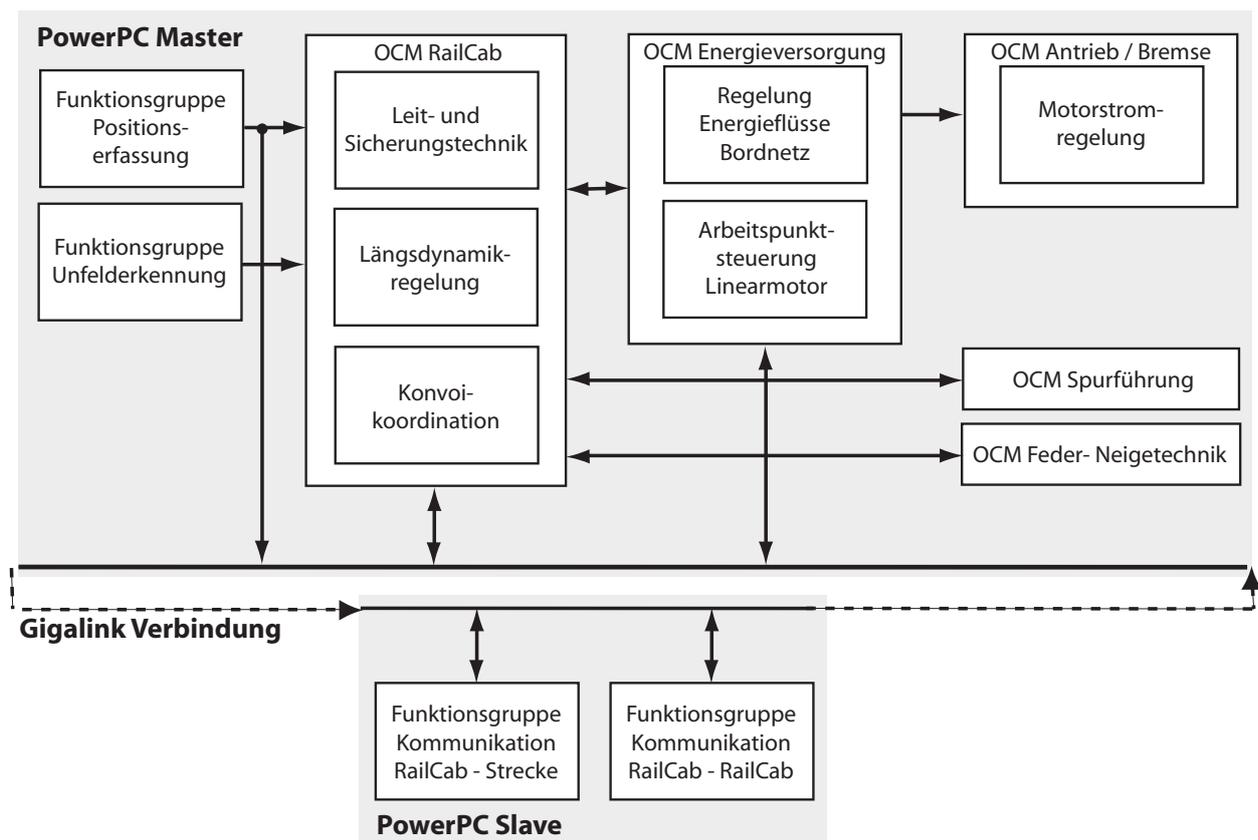
### 3.1.2 Fahrzeugseitige Informationsverarbeitung

Die Fahrzeugsteuerung erfolgt jeweils mittels eines Industrie-PC, die wiederum mit echtzeitfähiger Prototyping-Hardware bestückt sind. Es wird jeweils ein modulares Parallelrechnersystem der Firma dSPACE eingesetzt, bestehend aus zwei PowerPC (PPC Motorola MPC 750RISC Mikroprozessor mit einer Taktrate von 480 MHz auf einem DS1005 Prozessorboard). Die beiden PowerPC kommunizieren miteinander über einen optischen Gigalink mit einer Datenrate von 1,25 GBaud. Das dSPACE-System verfügt jeweils über mehrere I/O-Boards als Schnittstellen zu Sensorik und Aktorik sowie über ein Incremental-Encoder-Board. Die Kommunikation zu den Antriebs- und Bordnetzumrichtern erfolgt über eine digitale SSI-Schnittstelle, verteilt auf zwei Prototyping-Boards. Für Kommunikationsaufgaben stehen ein Board mit seriellen RS485-Schnittstellen sowie

eine UDP/IP-Kommunikationsboard zur Verfügung. An dem Prozessorboard steht zudem jeweils eine serielle RS232-Schnittstelle zur Verfügung.

Die auf der Rechnerhardware laufenden Tasks sind so auf die beiden PowerPC aufgeteilt, dass alle regelungstechnischen Aufgaben auf dem PowerPC MASTER ablaufen, während der PowerPC SLAVE alle Kommunikationsaufgaben erledigt. Eine Übersicht über die verteilt angeordneten OCM und Funktionsgruppen ist in Bild 3.3 dargestellt.

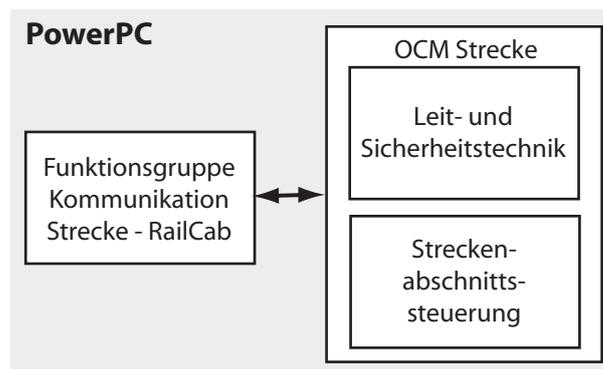
Um die Übersichtlichkeit und Handhabbarkeit dieser komplexen Anwendung zu gewährleisten, wird die in Kap. 2 beschriebene Systemstrukturierung konsequent umgesetzt. So verbleiben sämtliche Informationen zunächst in den jeweiligen OCM bzw. Funktionsgruppen. Es werden lediglich die von anderen Teilsystemen benötigten Daten übergeben. Innerhalb eines PowerPC geschieht dies durch eine direkte Kommunikationsstruktur, während alle zwischen den PowerPC auszutauschenden Daten auf einem Datenbus gebündelt werden und über die optische Gigalink-Verbindung ausgetauscht werden.



**Bild 3.3** Übersicht der Informationsverarbeitung der RailCabs

### 3.1.3 Streckenseitige Informationsverarbeitung

Auf dem Rechner zur Streckensteuerung laufen im Vergleich zu den Fahrzeugrechnern nur wenige Regel- und Steuerungsfunktionen ab, so dass ein einzelner PowerPC (PPC Motorola MPC 750RISC Mikroprozessor mit einer Taktrate von 480 MHz auf einem DS1005 Prozessorboard) ausreicht. Wesentliche Aufgaben sind die Funkkommunikationen zwischen den Fahrzeugen, die Streckenabschnittssteuerung sowie Leit- und Sicherheitsfunktionen.



**Bild 3.4** Übersicht Informationsverarbeitung Streckensteuerung

## 3.2 Datenaustausch zwischen verteilten Systemen

Nachfolgend werden die für den Konvoibetrieb benötigten Eigenschaften der Kommunikationskanäle genauer erläutert. Die Kommunikation zwischen Leitstand und RailCab sowie der Datenbus zwischen Streckensteuerung und den Unterwerken sind in [Pot06] bereits detailliert beschrieben. Dort werden vor allem die Echtzeitfähigkeit des Kommunikationsnetzwerkes sowie die Datenprotokolle beschrieben.

### 3.2.1 Beschreibung der Kommunikationskanäle

#### Anforderungen an die Kommunikationskanäle

Insbesondere für den Einsatz drahtloser Netzwerke sind mögliche Störungen und Einschränkungen genau zu analysieren. Da üblicherweise die Übertragungsgeschwindigkeit variieren kann und ebenso die Übertragungsqualität gewissen Schwankungen unterliegt, ist es erforderlich, die Güte der Verbindung kontinuierlich zu erfassen. Prinzipiell müssen die Netzwerke so gewählt und konfiguriert werden, dass sie in der Lage sind, die nachfolgend beschriebenen Anforderungen zu erfüllen.

## Anforderungen an die Übertragungszeiten

Hinsichtlich der Übertragungszeiten lassen sich hier zwei Arten von Kommunikationskanälen unterscheiden. Einerseits ist eine quasi-echtzeitfähige Kommunikation erforderlich, die direkt in die Regelungsstruktur eingebunden ist, sich also auf der Controller-Ebene des OCM RailCab befindet (vgl. Bild 2.6). Andererseits wird eine Kommunikation benötigt, die nachrichtenbasiert arbeitet und nur durch maximal zulässige Übertragungszeiten eingegrenzt wird. In Tabelle 3.2 sind diese Anforderungen aufgelistet.

**Tabelle 3.2** Anforderungen an die Übertragungszeiten der Kommunikationskanäle

Kommunikation	Echtzeitfähigkeit	Definierte maximale Übertragungszeit
<b>RailCab ↔ Streckensteuerung</b>	X	
<b>RailCab ↔ RailCab</b>		
Fahrdaten, Statorsollwerte, Meldungen	X	
Konvoikoordination		X
<b>RailCab ↔ Leitzentrale</b>		X
<b>Streckensteuerung - Statorabschnitte</b>	X	

## Analyse der Übertragungsqualität

Der Einsatz des doppelt gespeisten Linearmotors sowie der Betrieb von mehreren Fahrzeugen im Konvoi stellen aufgrund der räumlichen Verteilung ein über ein Netzwerk geregeltes System dar. Nur mit Hilfe von Kommunikationseinrichtungen können die regelungstechnischen Aufgaben ausgeführt werden. Die Koordination von verteilten Regelungsaufgaben erfordert einen isochronen Übertragungsmodus [HL08]. Das bedeutet, dass die Daten zum richtigen Zeitpunkt übertragen werden. Die Datenübertragung muss hierfür einer maximalen und minimalen Ende-zu-Ende-Verzögerung, einem sogenannten Verzögerungs-Jitter unterliegen. Zudem ist es möglich, dass Pakete fehlerhaft sind, verloren gehen oder die Verbindung ganz abreißt. Insbesondere drahtlose Kommunikationsverbindungen sind in ihrer Performanz limitiert und müssen daher kontinuierlich überwacht werden, so dass das Kommunikationssystem auch über Überwachungs- und Diagnosefunktionen verfügen muss. Daher wird für den Netzwerkzustand die Übertragungsqualität, auch als Quality of Service (QoS) bezeichnet, definiert. Die QoS ist die Gesamtheit der Qualitätsmerkmale in einem Netzwerk aus der Sicht des Dienstbenutzers [TV03].

Die genaue Bewertung der Netzwerkqualität ist abhängig von der eingesetzten Funktechnik und wird daher differenziert betrachtet und ausgewertet. Neben der Maskierung von Werte- und Paketfehlern ist bei drahtlosen Verbindungen eine Analyse des zeitlichen Verhaltens notwendig, da Übertragungszeiten häufig nicht oder nur sehr ungenau garantiert werden können.

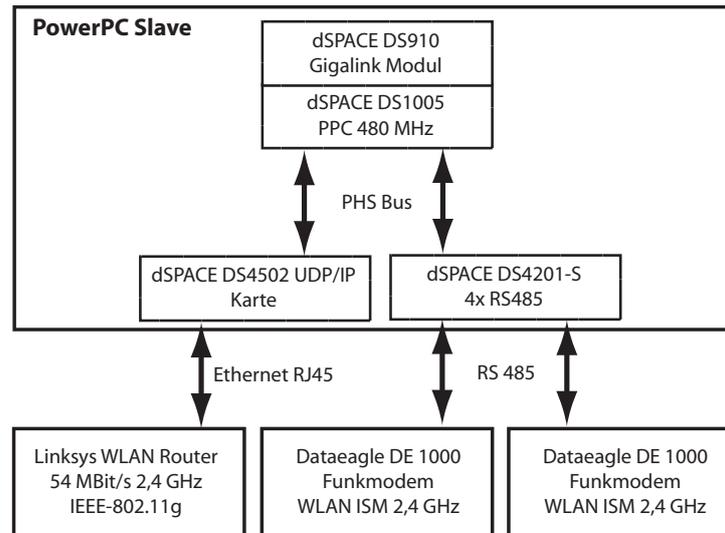
**Tabelle 3.3 Sicherheitsmaßnahmen zur Erkennung von Übertragungsfehlern**

Fehlerart	Maßnahme		
	Sequenznummer	Zeitstempel und Watchdog-Timer	Prüfsumme/Codierung
Datenverfälschung			X
Datenverlust			X
Paketverlust	X	X	
Verzögerung		X	
Verbindungsabbruch		X	
Falsche Paketfolge	X	X	

Aus Tab. 3.3 ist ersichtlich, dass die Datentelegramme über eine Prüfsumme und einen Zeitstempel verfügen sollten, um alle Fehlerarten erkennen zu können.

### Auswahl der Kommunikationshardware

Aufgrund der zuvor erläuterten Anforderungen an Übertragungszeit und Übertragungsbandbreite kommen zwei unterschiedliche Drahtlosnetzwerke zum Einsatz. Dies ist einerseits eine Verbindung, die per industriellen Dataeagle-Modems [Sch01] realisiert und zwischen Fahrzeug und Strecke zur Übermittlung der Sollwerte für den Stator sowie zwischen Fahrzeug und Fahrzeug zur Aushandlung der Statorsollwerte im Konvoibetrieb eingesetzt wird, also auf Controller-Ebene erfolgt. Andererseits existiert auf Ebene des reflektorischen Operators zwischen den Fahrzeugen zur Fahrzeugkoordination eine weitere Funkverbindung, die auf standardisiertem WLAN gemäß IEEE-802.11 basiert und ein UDP/IP-Protokoll nutzt. Die resultierende Struktur, die sich für den PowerPC Slave ergibt, ist in Bild 3.5 dargestellt.



**Bild 3.5** Architektur PowerPC Slave und Kommunikationshardware

### 3.2.2 Kommunikation auf Controller-Ebene

Die Funkkommunikation auf Controller-Ebene erfolgt auf dem 2,4 GHz ISM-Band. Wie in Bild 3.5 dargestellt, werden zwei Funkmodems eingesetzt, die jeweils über eine serielle RS485-Schnittstelle und ein DS4201-S Serial-Interface-Board mit dem PowerPC verbunden sind. Mit dieser Kommunikationstopologie lassen sich lediglich Punkt-zu-Punkt-Verbindungen und eine eher geringe Datenrate (115,2 kBaud) realisieren.

Die über die Schnittstellen anliegenden Daten werden jeweils nach einem Receive-Interrupt ausgelesen. Ein Interrupt wird ausgelöst, sobald die erforderliche Datenmenge am Empfänger anliegt. Auf diese Weise wird eine relativ genaue Kommunikationszeit zwischen den Teilnehmern gewährleistet [Sch01]. Diese Annahme ist auf Controller-Ebene zwingend notwendig, um Funkdaten unter Quasi-Echtzeitbedingungen in die Regelung einzubinden.

Aufgrund der geringen Datenübertragungsrate werden nur so viele Daten, wie zwingend auf der Controller-Ebene benötigt, übermittelt. Dem Datentelegramm sind bereits vom Hersteller überlagerte Informationen hinzugefügt, die eindeutig Adressat und Absender der Nachrichten kennzeichnen. Diese Daten enthalten jedoch keinerlei Fehler- oder Vollständigkeitsprüfungen der Nutzdaten des Telegramms.

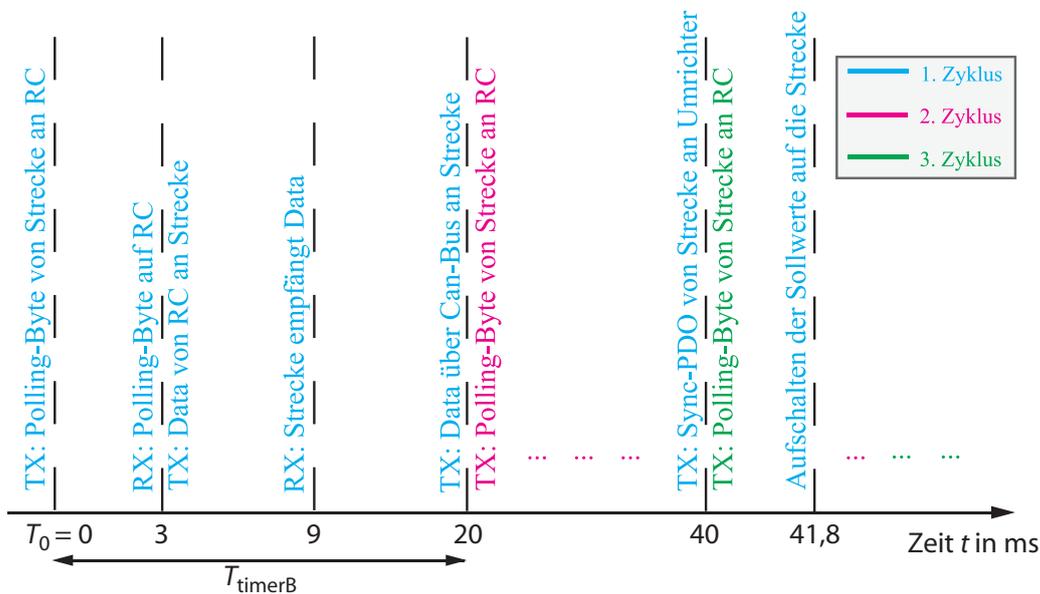
### Kommunikation zwischen Fahrzeug und Streckensteuerung

Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Streckensteuerung ermöglicht die Übertragung folgender Daten:

- Fahrzeugposition zur Aktivierung der gegenwärtig benötigten Statorabschnitte und zur Streckenüberwachung,
- Fahrzeuggeschwindigkeit zur Überprüfung zulässiger Betriebsgeschwindigkeiten und zur Kollisionsvermeidung,
- Amplitude und Frequenz des Statorstroms,
- Statusinformation zur Aktivierung des Konvoimodus.

In entgegengesetzter Richtung muss eine Statusinformation übertragen werden, die den Empfang der Daten bestätigt und insbesondere auch die Möglichkeit bietet, auf das Fahrzeug zuzugreifen. Zwischen diesen beiden Teilnehmern findet folglich generell eine periodische Kommunikation statt.

Der bidirektionale Datentransfer zwischen Fahrzeug und Streckensteuerung wird in einem festen Takt (Hardware-Interrupt auf dem PowerPC im Zeitraster  $T_{\text{timerB}} = 20 \text{ ms}$ ) durch die Streckensteuerung angeregt, indem jeweils ein Pollingbyte zeitgleich (z.B. zum Zeitpunkt  $T_0$ ) an die Fahrzeuge gesendet wird.



**Bild 3.6** Zeitlicher Ablauf der Funkkommunikation für ein einzelnes Fahrzeug

Infolge des Receive-Interrupts nach Empfang des Pollingbytes zum Zeitpunkt  $T_1 = T_0 + 3 \text{ ms}$  antwortet das Fahrzeug. Die neuen Sollwerte stehen zum Zeitpunkt  $T_2 = T_0 + 9 \text{ ms}$  der Streckensteuerung zur Verfügung. Um die Daten an die entlang der

Strecke angeordneten Unterwerke über den CANopen-Bus zu verteilen wird ein weiterer Taktzyklus  $T_{\text{timerB}}$  benötigt. Zum Zeitpunkt  $T_3 = T_0 + 41,8 \text{ ms}$  werden die Daten durch ein Synchronisations-PDO zeitsynchron streckenseitig aufgeschaltet (siehe Bild 3.6). Der genaue Aufbau und die Funktionsweise dieser Kommunikation sind bereits in [Pot06] beschrieben.

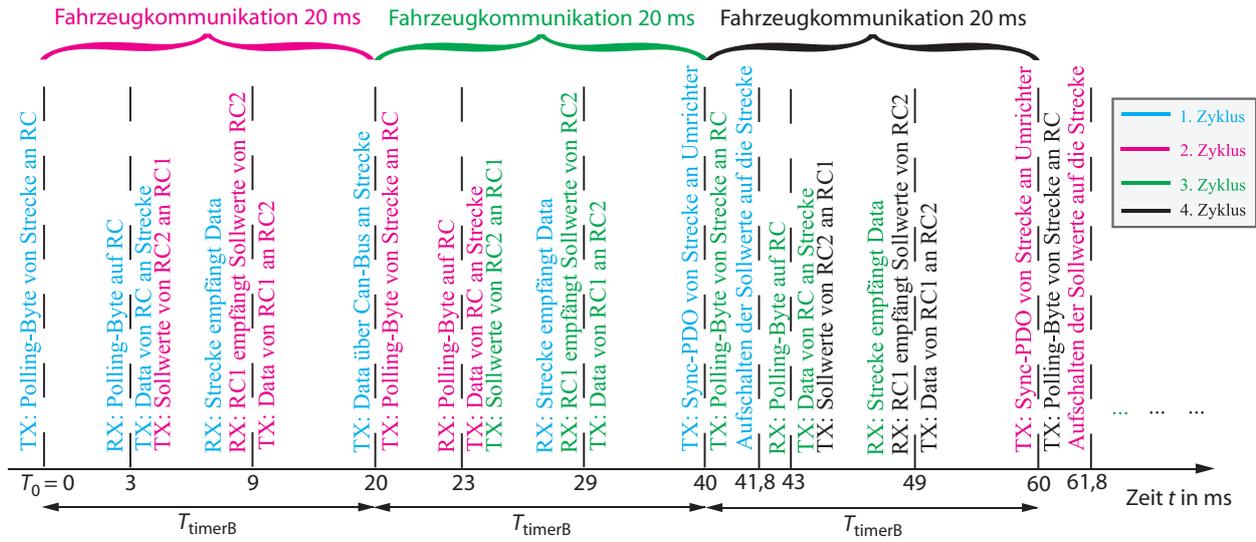
### **Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation**

Über die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen werden folgende Daten bidirektional und periodisch ausgetauscht:

- Position und Geschwindigkeit der Fahrzeuge zur Abstandsregelung,
- Statusinformation zur Aktivierung des Konvoimodus sowie zur Übermittlung von Fehlermeldungen,
- Angeforderte Schubkraft und Leistungsübertragung zur Bestimmung des Arbeitspunktes im Konvoibetrieb.

Die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ist in das Zeitraster der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Strecke eingliedert. Da im Falle einer Konvoifahrt mehrere Fahrzeuge gemeinsamen einen Statorabschnitt befahren, muss ein Aushandeln der Sollwerte für den jeweiligen Statorabschnitt erfolgen und es darf nur ein Fahrzeug die Sollwerte an die Streckensteuerung übermitteln. Um folglich der Kommunikation zwischen den Fahrzeugen eindeutige Abläufe und Priorisierungen aufzuprägen, werden die Rollen KONVOI-MASTER und KONVOI-SLAVE deklariert.

Die Kommunikation startet ausgehend vom Konvoimaster nach Empfang des Pollingbytes. Der Konvoislave antwortet innerhalb des Zeitfensters. Daher werden im ersten Taktzyklus  $T_{\text{timerB}}$  die Daten zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht (siehe Bild 3.7). Im zweiten Zyklus werden die vom Konvoimaster ausgewerteten Daten an den Streckensteuerung übermittelt (vgl. Bild 3.6) Ein Vergleich zwischen den zeitlichen Abläufen im Konvoibetrieb und Einzelfahrzeugbetrieb zeigt, dass ein Aufschalten neuer Stator-sollwerte im Konvoibetrieb erst nach 61,8 ms möglich ist.



**Bild 3.7 Zeitlicher Ablauf der Funkkommunikation im Konvoibetrieb**

### Datentelegramme

Die Datentelegramme, die zwischen Fahrzeug und Strecke sowie zwischen Konvoimaster und Konvoislave bidirektional verschickt werden, sind in Bild 3.8 dargestellt. Es werden jeweils 8 Byte verschickt, von denen ein Byte als Startkennung benötigt wird und ein weiteres Byte als Prüfbyte zur Erkennung von Übertragungsfehlern dient. Die übrigen 6 Byte enthalten die Nutzdaten.

Datentelegramm von Fahrzeug zu Strecke						
Startkennung	Strom-frequenz	Strom-amplitude	Position	Geschwindig-keit	Status-meldung	Prüfbyte

Datentelegramm von Konvoimaster zu Konvoislave						
Startkennung	Strom-frequenz	Strom-amplitude	Position	Geschwindig-keit	Status-meldung	Prüfbyte

Datentelegramm von Konvoislave zu Konvoimaster						
Startkennung	Sollwert-schubkraft	Energieüber-tragung/Prior.	Position	Geschwindig-keit	Status-meldung	Prüfbyte
Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4 und 5	Byte 6	Byte 7	Byte 8

**Bild 3.8 Datentelegramme der Funkstrecken**

Im Falle des Konvoibetriebs ist nur ein Fahrzeug dafür zuständig, Sollwerte an die Strecke zu übergeben, so dass wie zuvor beschrieben bezüglich der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation die Rollen Konvoimaster und Konvoislave verteilt werden. Da der Master verantwortlich ist für die Übertragung der Statorsollwerte zur Strecke, werden diese Informationen vom Konvoimaster zum Konvoislave gesendet, aber nicht in umgekehrter Richtung. Der Slave hingegen muss seine angeforderten Sollwerte zur Schubkraft und

zur Leistungsübertragung dem Master mitteilen. Anhand dieser Werte bestimmt der Konvoimaster den Arbeitspunkt des gemeinsam befahrenen Stators. Bild 3.8 zeigt die Datentelegramme der Dataeagle-Funkstrecken.

Bevor die Daten gesendet werden können, müssen diese codiert bzw. umgerechnet werden. Der Umrechnung liegen die Quantisierungen nach Tabelle 3.4 zugrunde. Da hinsichtlich der Leistungsübertragung eine grobe Quantisierung vollkommen ausreichend ist, ist es zweckmäßig, sowohl den Wert der angeforderten Leistungsübertragung als auch die Priorität in einem Byte zu verpacken.

**Tabelle 3.4 Quantisierung der Funkdaten**

Parameter	Werteintervall		Quantisierung
	min.	max.	
Stromfrequenz	-100 Hz	100 Hz	0,8 Hz
Stromamplitude	0 A	155 A	0,7 A
Schubkraft	-1200 N	1200 N	10 N
Leistungsübertragung	0 W	6000 W	250 W
Priorisierung	0	5	1
Position	0	480 m	0,03 m
Geschwindigkeit	- 10 m/s	10 m/s	0,08 m/s

Das Datentelegramm, das von der Strecke zu den Fahrzeugen geschickt wird, enthält nur ein Byte. Dies ist wie in [Pot06] beschrieben ein Pollingbyte, das einerseits die Funkkommunikation im fest vorgegebenen Takt anregt. Andererseits enthält dieses Byte den erkannten Systemzustand der von den Fahrzeugen empfangenen Daten. Tabelle 3.5 zeigt die Informationen des Pollingbytes.

Die Zustände SYSTEMSTART, STARTBEREIT, BETRIEB OK und STÖRUNG sind für den normalen Betrieb vorgesehen. Die Meldung KONVOIMODUS AKTIVIERT wird als Bestätigung gesendet, wenn die Anforderung der Fahrzeuge während der Konvoifahrt empfangen worden ist. Die Zustände SYNCHRONE BREMSUNG und SCHNELLBREMSUNG leiten unmittelbar Störfallroutinen ein. Mit der Meldung ABRUCH kann auch ein einseitiger Kommunikationsabbruch propagiert werden. Durch die Hammingdistanz von vier ist eine gute Störsicherheit gegeben (vgl. [Pot06]).

Da nach dem Umschalten auf den Konvoibetrieb die Streckensteuerung nur noch die Startersollwerte aufschaltet, die vom Master gesendet werden, wird an beide Fahrzeuge das gleiche Pollingbyte gesendet. Schließlich ist für den Konvoislave nur von Bedeutung, wie die Empfangsqualität der relevanten, vom Master gesendeten Sollwerte gewesen ist. Eine Ausnahme bilden die beiden zuvor genannten Störfallroutinen.

**Tabelle 3.5 Informationen des Pollingbytes**

Meldung	Wert	
	binär	Dezimal
Systemstart	1 1 1 1 1 1 1 1	255
Startbereit	1 1 0 0 1 1 0 0	204
Betrieb OK	0 0 0 0 1 1 1 1	15
Störung	1 1 1 1 0 0 0 0	240
Konvoimodus aktiviert	0 1 0 1 0 1 0 1	85
Synchrone Bremsung	1 0 1 0 1 0 1 0	170
Schnellbremsung	0 0 1 1 0 0 1 1	51
Abbruch	0 0 0 0 0 0 0 0	0

### Fehlererkennung und Fehlerbehandlung

Der Dataeagle-Kommunikation ist bereits ein herstellerspezifisches Protokoll [Sch01] überlagert. Da nach dem Empfang von Daten jeweils ein Receive-Interrupt ausgelöst wird, können die Paketlaufzeiten sehr präzise reproduziert werden, so dass diese als nahezu konstant angenommen werden können [Pot06]. Daher sind lediglich die folgenden Störeinflüsse bzw. Einschränkungen zu berücksichtigen:

- Wertefehler innerhalb der Datenpakete,
- Paketverluste,
- Verbindungsabbrüche.

Fehlerhafte Datenpakete können entsprechend der im Datentelegramm enthaltenen Startkennung und der Prüfsumme erkannt werden. Da die Daten gebündelt jeweils als Byte verschickt werden, kann anhand der Startkennung der Beginn eines neuen Datentelegramms erkannt werden. Auf diese Weise werden Verschiebungen im Register des Empfängers sichtbar. Durch das zeitlich festgelegte Übertragungsraster können zudem Paket-

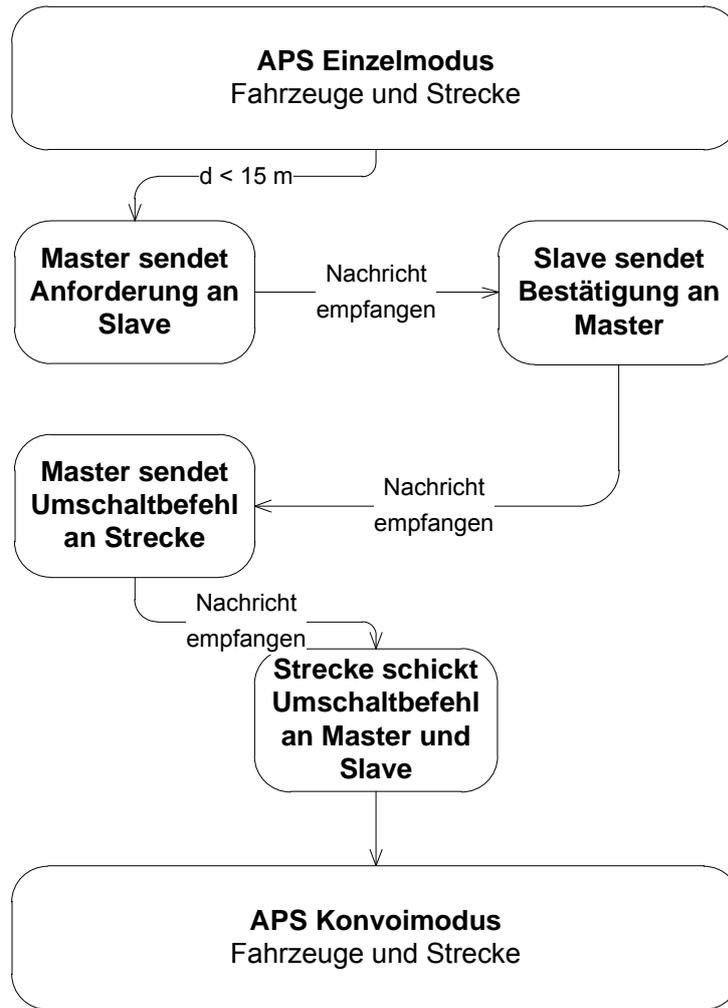
verluste und damit verbunden auch Verbindungsabbrüche sicher detektiert werden, so dass die Qualität der Funkverbindung konkret beziffert werden kann. Dazu dient der zeitliche Mittelwert von Paketfehlern über einen definierten Horizont von beispielsweise 2 Sekunden, entsprechend einer Anzahl von 100 Übertragungszyklen. Dieser Wert wird schließlich in der Gefahren- und Fehleranalyse berücksichtigt (siehe Kap. 6).

### **Integration der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in die Struktur der Fahrzeug-zu-Strecke-Kommunikation**

Werden die Fahrzeuge im Konvoi mit geringen Fahrzeugabständen betrieben, müssen die verteilten Systeme, also die Läufer der Fahrzeuge sowie der Stator allesamt synchronisiert sein. Aus diesem Grund arbeitet die Streckensteuerung als Taktgeber des Gesamtsystems. Dieser sendet alle 20 ms das Pollingbyte mit der Datenanforderung an die Fahrzeuge.

Das Pollingbyte dient zugleich als Empfangsbestätigung der vom Fahrzeug empfangenen Daten. Im Betriebsmodus APS-KONVOI kann nur ein Fahrzeug die Statorsollwerte vorgeben. Dieses Fahrzeug wird wie bereits beschrieben als Konvoimaster und das jeweilige andere als Konvoislave bezeichnet. Um in diesem Fall sicherzugehen, dass beide Fahrzeuge in ihrer jeweiligen Arbeitspunktsteuerung (APS) die zeitlich korrekten Statorwerte verwenden, schickt die Streckensteuerung die Empfangsbestätigung der Daten vom Konvoimaster auch an den Konvoislave. Die Umschaltung auf den Modus APS-Konvoi erfolgt gemäß Bild 3.9.

Die Aktivierung des APS-Konvoimodus wird erst nach Unterschreitung eines Abstandes von 15 m eingeleitet. Somit ist eine rechtzeitige Umstellung stets sichergestellt. Das Zurückschalten geschieht wiederum nach Überschreiten von 20 m Fahrzeugabstand oder bei Eintritt einer Schnellbremsung des Folgefahrzeugs.



**Bild 3.9** Ablaufdiagramm zur Aktivierung des Modus APS-Konvoi

### 3.2.3 Kommunikation auf Ebene des reflektorischen Operators

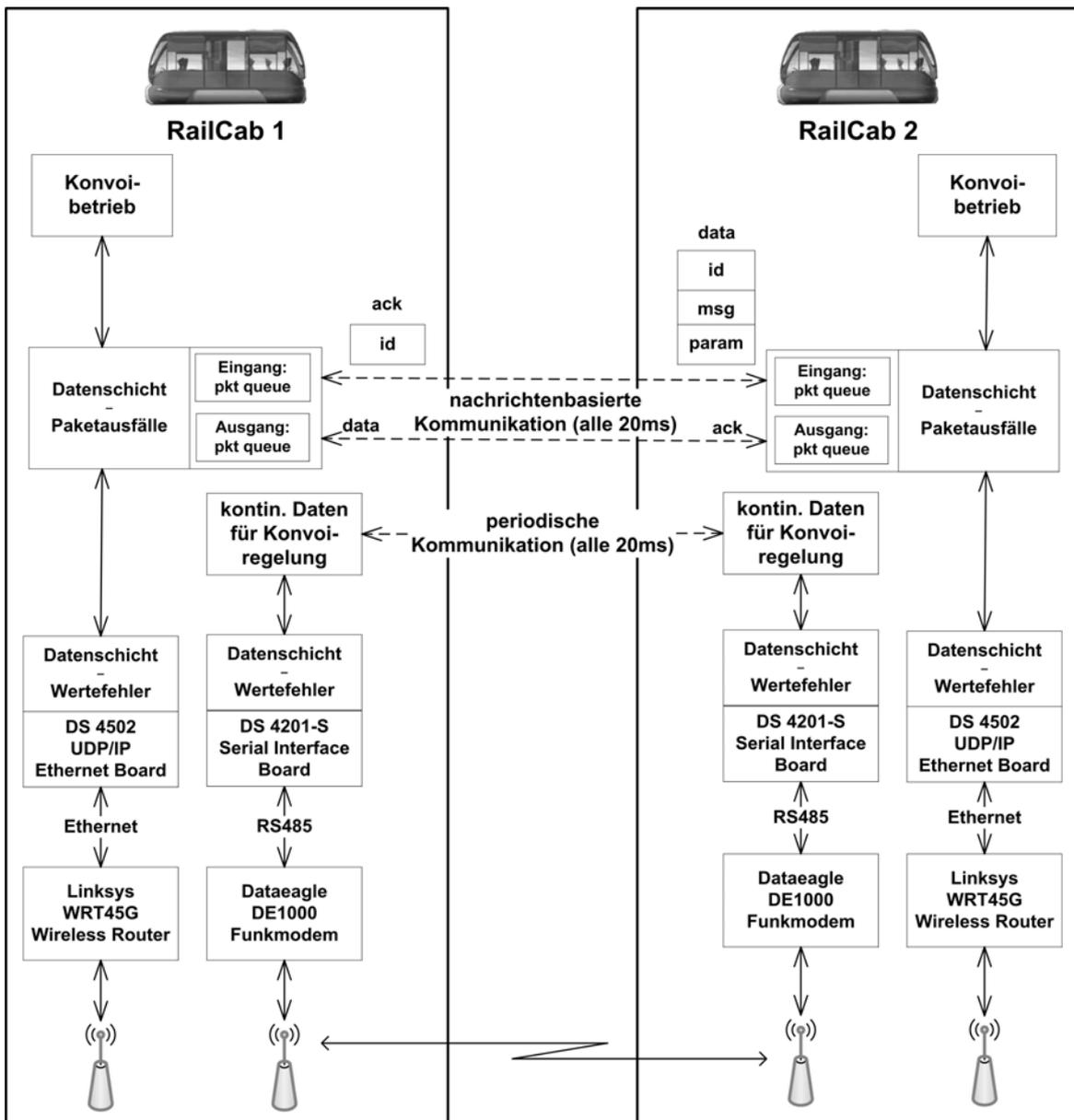
Die Kommunikation auf der Ebene des reflektorischen Operators erfolgt mittels WLAN gemäß dem Standard IEEE802.11. Der Aufbau ist in Bild 3.5 dargestellt. Über ein Ethernet-Board DS4502 (max. Datenrate 3 Mbit/s) ist ein konventioneller WLAN-Router verbunden. Der eingesetzte Funkkommunikationsstandard erlaubt eine offene Netzwerkstruktur, so dass mit einer Vielzahl an Teilnehmern kommuniziert werden und auch eine sogenannte Broadcasting-Funktion eingesetzt werden kann, bei der alle im Subnetz befindlichen Teilnehmer angesprochen werden können.

#### Aufgaben der Kommunikation

Die UDP/IP-Kommunikation zwischen den Fahrzeugen stellt einen zumindest teilweise redundanten Kommunikationskanal dar. Aufgrund seiner größeren Übertragungsband-

breite können jedoch auch weitere Daten übertragen werden, die insbesondere zur Konvoikoordination genutzt werden können:

- Anfrage zum Bilden oder Auflösen eines Konvois,
- Parameter für die Konvoifahrt (Geschwindigkeit, Beschleunigungen, Fahrmanöver),
- Position und Geschwindigkeit des Fahrzeugs für Sicherheitsabfragen.



**Bild 3.10 Kommunikation zwischen zwei RailCabs im Konvoibetrieb**

Dieser Kommunikationskanal beinhaltet dementsprechend zwei unterschiedliche Kommunikationsaufgaben. So werden einerseits ebenso wie bei der Dataeagle-Kommunikation kontinuierlich Daten übertragen, die auch für die Fahrzeugregelung verwendet werden können (Redundanz). Andererseits findet eine nachrichtenbasierte,

also ereignisgesteuerte, Kommunikation statt, die zur Konvoikoordination benötigt wird (siehe Bild 3.10).

Die nachrichtenbasierte Kommunikation ist in den kontinuierlichen Kommunikationskanal integriert. D. h. die Inhalte der jeweiligen Datentelegramme werden ereignisbasiert zusammengesetzt. Dazu wird ein Queuing-Verfahren angewendet, bei dem eine Warteschlange für die Ausgangsdatenpakete gebildet und ebenso eine Schlange für die eingegangenen Datenpakete erstellt wird. Die Zuordnung der Daten erfolgt durch das Senden von ID und Message.

### **Aufbau und Eigenschaften der UDP/IP Kommunikation**

Die Kommunikation zwischen den Systemen erfolgt jeweils mit einem dSPACE DS4502 Communication-Module-Carrier-Board. Das auf diesem Board montierte Ethernet-Communication-Module Hilscher COM-EN stellt einen unter SIMULINK lauffähigen RTI UDP/IP-Blocksatz zur Verfügung. Resultierend aus dem einfachen Protokollhandling, wird das UDP/IP-Protokoll als auf die Ethernet Technologie aufgesetzte Transportschicht verwendet. Um Daten drahtlos kommunizieren zu können, ist das Board mit einem handelsüblichen 54 Mbit WLAN-Router und dazugehöriger Rundstrahlantenne verbunden.

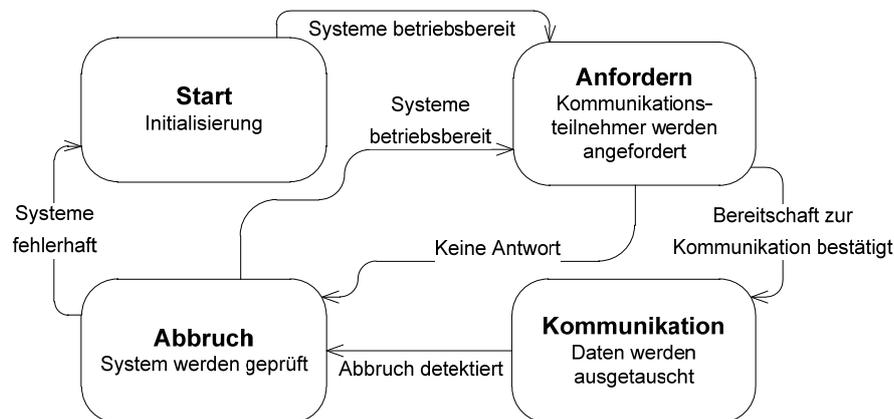
Das Internet Protocol (IP) befindet sich in der 3. Ebene des OSI-Schichtenmodells. Per IP werden Datenpakete, auch Datagramme genannt, so versendet, dass alle Informationen, die zur korrekten Weiterleitung der Datagramme erforderlich sind, enthalten sind. Allerdings gewährleistet das Protokoll nicht, dass diese Datagramme in der Sendereihenfolge auch empfangen werden. Zudem können Pakete verloren gehen oder mehrfach beim Empfänger ankommen. Eine Fehlerkorrektur findet nicht statt.

Das IP-Protokoll beinhaltet einen sogenannten IP-Header. Dieser enthält neben Quell- und Zieladresse auch eine Header-Prüfsumme, die allerdings lediglich den Header absichert. Der Datenteil des Telegramms bleibt hingegen ungesichert.

Das User Datagram Protocol (UDP) übernimmt die Adressierung der Datenpakete, ohne jedoch die Datenübertragung gegenüber möglichen Fehlern zu sichern. Das Protokoll ist auf der 4. Schicht (Transportschicht) des OSI-Schichtenmodells angeordnet und somit dem IP aufgesetzt. UDP stellt einen nicht zuverlässigen Übertragungsdienst dar, da weder Fehlerkennungs- noch Fehlerkorrekturmaßnahmen für fehlende oder fehlerbehaftete Datenpakete bestehen. Detaillierte Beschreibungen zur eingesetzten UDP/IP-Kommunikation sind in [Rad08] enthalten.

## Initialisierung der Funkstrecke

Da es sich bei der UDP/IP-Kommunikation nicht um eine Punkt-zu-Punkt Verbindung handelt, ist eine Initialisierung der Kommunikation erforderlich. Zur Initialisierung wird der Zustandsautomat nach Bild 3.11 eingesetzt.



**Bild 3.11 Zustandsautomat der Funkkommunikation**

Nach dem Einschalten eines Fahrzeugs wird zunächst der Modus ANFORDERN aktiviert. Erst nach einer Empfangsbestätigung wird die KOMMUNIKATION gestartet. Nach einem Funkabbruch wird, wenn kein Fehler vorliegt, wieder in den Zustand ANFORDERN gewechselt. Auf diese Weise wird einerseits die Funkkommunikation gestartet und andererseits auch bei auftretenden Fehlerzuständen neu initialisiert.

## Fehlererkennung und Fehlerbehandlung

Resultierend aus den zuvor beschriebenen Eigenschaften des Protokolls ergeben sich in Kombination mit einem Drahtlosnetzwerk folgende potenzielle Fehlermöglichkeiten:

- Datenverlust oder Datenverfälschung innerhalb der UDP Nutzdaten,
- Paketverluste,
- Variierende Übertragungslatenzen,
- Verbindungsabbrüche.

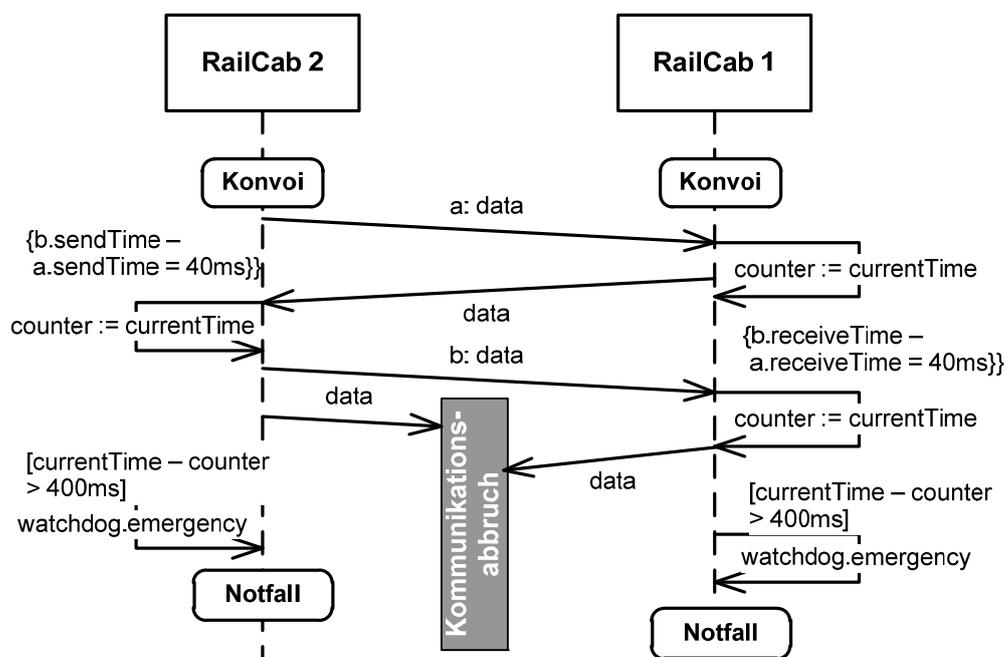
Folglich müssen Maßnahmen getroffen werden, mit denen einerseits diese Fehler erkannt und gegebenenfalls korrigiert werden können und andererseits eine Bewertung des Netzwerkzustandes vorgenommen werden kann.

Mit dem eingesetzten WLAN ist keine zeitlich deterministische Datenübertragung möglich. Jedoch kann die Gesamtlaufzeit beider Kommunikationswege ermittelt werden, indem die lokale Zeit des Senders in das Datentelegramm integriert wird und vom Empfän-

ger in das zurückgeschickte Telegramm geschrieben wird. Auf diese Weise können zu lange Paketlaufzeiten sicher erkannt werden.

Die Detektion von Paketverlusten erfolgt, indem der Receiver der UDP-Verbindung im Takt des Transmitters abgefragt wird. Wird über einen Zyklus kein neues Datenpaket empfangen, so ist ein Paket verloren gegangen. Mittels des zuvor beschriebenen Zeitstempels, kann die jeweils benötigte Übertragungszeit für beide Kommunikationswege bestimmt und ein Überholen von Datenpaketen sicher erkannt werden. Auf diese Weise kann eine genaue Aussage über das Zeitverhalten und insgesamt über die Qualität der Funkstrecke getroffen werden.

Gehen innerhalb der für einen Funkabbruch vordefinierten Zeitspanne keine neuen Datenpakete ein, so gibt ein Watchdog-Timer eine Abbruchmeldung aus. Der prinzipielle Ablauf der Funkabbruchererkennung ist in Bild 3.12 dargestellt.



**Bild 3.12** Sequenzdiagramm zur Funkabbruchererkennung [HTS+08a]

### Maskierung von Wertefehlern

Eine Überwachung des Nachrichtenteils der gesendeten Daten findet in dem zugrunde liegenden Rahmen eines UDP/IP-Protokolls nicht statt. So können beispielsweise Bitfehler innerhalb des Nachrichten- oder Prüfteils auftreten. Folglich muss ein Protokoll aufgesetzt werden, das eine Fehlerüberwachung ermöglicht. Ein wirksames Mittel gegenüber diesen Fehlern ist der Einsatz von in der Nachrichtentechnik häufig verwendeten BCH-Codes [Bos98]. Es handelt sich dabei um lineare Blockcodes, die sich aus  $k$  Infor-

mationssymbolen und  $n-k$  redundanten Kontrollsymbolen zusammensetzen, so dass ein Codewort der Länge  $n$  entsteht. Dabei wird ein dem Sender und Empfänger bekanntes Codierungsverfahren eingesetzt, das die Codewörter erzeugt.

Das Prinzip der Fehlercodierung beruht darauf, dass alle Codewörter als Produkt aus dem zugehörigen Nachrichtenwort und dem Generatorpolynom dargestellt werden können. Auf Empfängerseite wird das Codewort durch das Generatorpolynom dividiert. Im fehlerfreien Fall hat der Rest der Division den Wert Null. Hier kommt ein (63, 45, 3)-BCH-Code zum Einsatz, der eine Informationslänge von 45 Bit zulässt und daraus jeweils ein Codewort mit einer Länge von 63 Bit erzeugt. Die minimale Hammingdistanz des Codes beträgt drei. Folglich können mit diesem Code bis zwei Einzelbitfehler erkannt werden. Die Codewortlänge von 63 Bit bewirkt, dass ein Codewort jeweils im Datentyp Double (8 Byte) dargestellt werden kann. Das Generatorpolynom  $GP(x)$  zur Erzeugung des Codewortes lautet:

$$GP(x) = x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{15} + x^9 + x^7 + x^6 + x^3 + x^2 + x + 1 \quad (3.1)$$

In der Darstellung als Bitfolge lautet das Generatorpolynom:

$$GP = 1111\ 000\ 001\ 011\ 001\ 111 \quad (3.2)$$

Das hier eingesetzte Codierungsverfahren wurde in [Rad08] vorgestellt und ausführlich zur Maskierung von Wertefehlern untersucht.

## Datentelegramme

Das Datentelegramm, das per UDP/IP-Kommunikation zwischen RailCabs zyklisch alle 20 ms gesendet wird, ist in Tabelle 3.6 dargestellt und untergliedert sich in drei Bereiche:

- Datenoverhead zur Laufzeitbestimmung der Datenpakete und zur Detektion von Paketverlusten,
- Kontinuierlicher Datenaustausch für Regelaufgaben und Sicherheitsabfragen,
- Datenpakete der nachrichtenbasierten Kommunikation für Koordinationsaufgaben.

Zunächst wird den Nutzdaten (Daten der kontinuierlichen Kommunikation sowie Daten der nachrichtenbasierten Kommunikation) ein weiterer Datenoverhead zur Datensicherung hinzugefügt. Dieser beinhaltet die lokale Systemzeit zur Erkennung von Funkabbrüchen und zur Bestimmung der Übertragungszeiten. Der BCH-Code ermöglicht wie zuvor beschrieben eine Codierung von bis zu 45 Bit, so dass die Codierung jeweils für einzelne Telegrammanteile durchgeführt wird. Folglich resultieren aus den ursprünglich 145 Bit

insgesamt 256 Bit, die als vier Double-Werte darstellbar sind und per UDP/IP-Protokoll übertragen werden.

**Tabelle 3.6 Datentelegramm der UDP/IP-Kommunikation**

Information	Nachrichtenteil	Datenlänge in Bit	Datenlänge in Bit mit BCH-Code
Systemzeit	Overhead	32	64
Position	periodische Kommunikation	40	64
Abschnitt		8	64
Geschwindigkeit		16	
Systemstatus		8	
Acknowledge	nachrichtenbasierte Kommunikation	1	64
ID		8	
Message		8	
Parameter		24	
		<b><math>\Sigma</math> 145 Bit</b>	<b><math>\Sigma</math> 256 Bit</b>

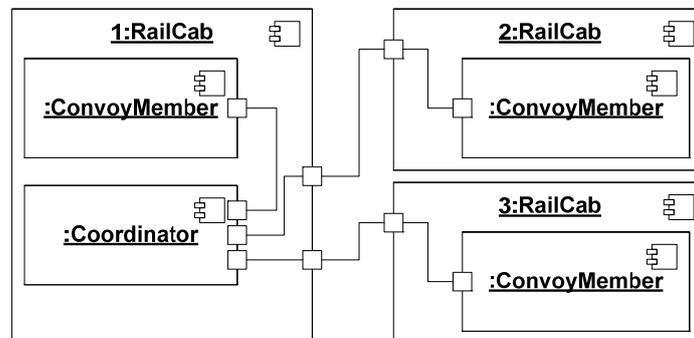
### Konvoikoordination mittels nachrichtenbasierter Kommunikation

Um einen Konvoi bilden und auflösen zu können, wird eine Koordinations- und Initialisierungsstruktur eingesetzt. Diese sieht vor, dass jeweils ein RailCab pro Konvoi die Rolle eines Koordinators annimmt und die übrigen Fahrzeuge jeweils die Rolle des Konvoifahrzeugs besitzen (siehe Bild 3.13). Prinzipiell kann jedes Fahrzeug die Rolle des Koordinators ausüben.

Zur Organisation und Koordination des Konvoibetriebs wird, wie zuvor beschrieben, eine nachrichtengesteuerte Datenübertragung verwendet, für die Datenpakete im Übertragungsprotokoll der WLAN-Kommunikation reserviert sind.

Innerhalb der kontinuierlichen Kommunikation müssen Wertefehler maskiert und lediglich der Verlust von Daten detektiert werden. Hinsichtlich der nachrichtengesteuerten Kommunikation können Paketverluste nicht so einfach kompensiert werden. Eine wichtige Eigenschaft dieser Kommunikationsart ist, dass nicht permanent die gleichen Datenpakete versendet werden, sondern lediglich eine bestimmte Datenmenge im Telegramm freigehalten wird, die aber mit unterschiedlichen Informationen belegt werden kann. Dies

hat zur Folge, dass ein Datenpaket z.B. eine bestimmte Information enthält, die keinen direkten inhaltlichen Bezug zu den zuvor oder zukünftig gesendeten Daten hat. Folglich besteht nur die Möglichkeit, diese Daten solange zu schicken, bis der Adressat den korrekten Empfang der Nachricht bestätigt hat.

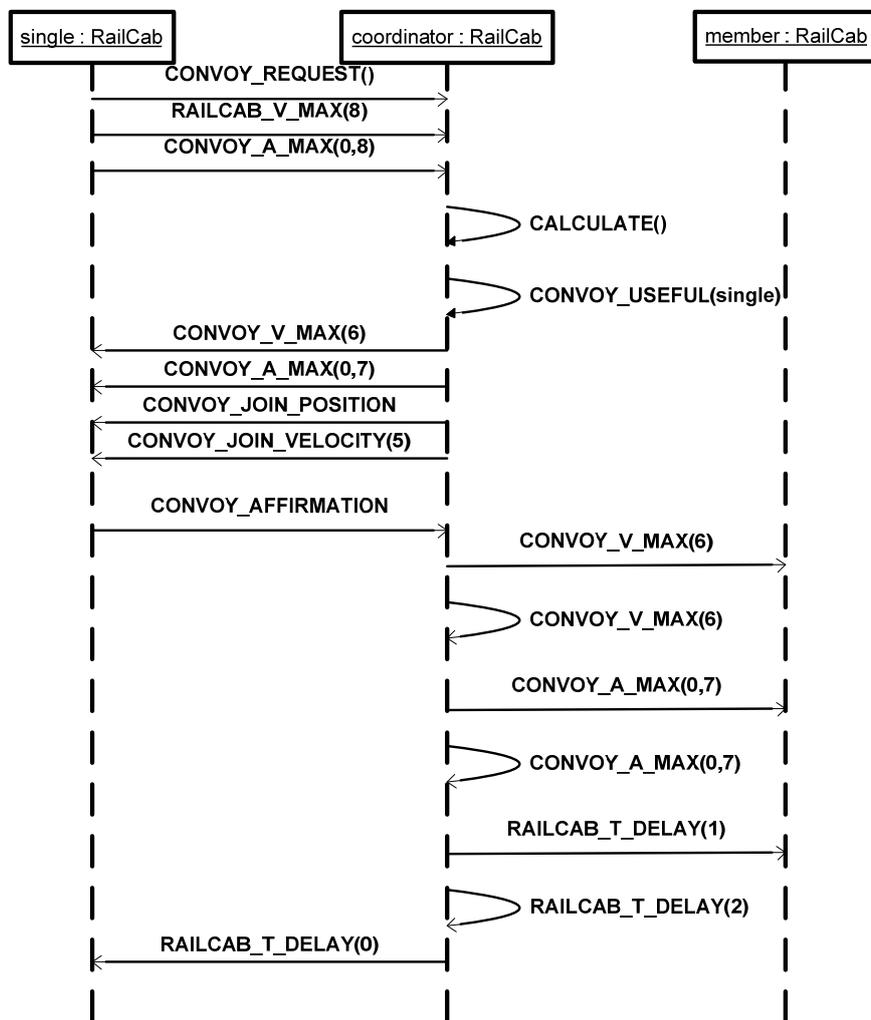


**Bild 3.13** UML-Beschreibung der Organisationsstruktur [HTS+08a]

Realisiert wird dies durch einen Telegrammteil, der aus jeweils vier Daten besteht [Tic09]. Dabei wird zwischen ACKNOWLEDGE (ack), ID (id), MESSAGE (msg) und PARAMETER (param) unterschieden (vgl. Bild 3.10). Mit dem ACKNOWLEDGE wird der Empfang des jeweiligen Datenpaketes bestätigt. Die ID wird benötigt zur Fahrzeugidentifikation. Mit MESSAGE wird die entsprechende Nachricht bezeichnet und der eigentlich auszutauschende Wert ist im Paket PARAMETER enthalten. Im Gegensatz zu den kontinuierlich ausgetauschten Daten, bei denen zumindest kurzfristige Paketverluste kein größeres Problem bedeuten, können diese hier nicht einfach toleriert bzw. übergangen werden. Entscheidend ist hier, dass keine Informationen verloren gehen dürfen aber auch keine Informationen zu falschen Zeitpunkten zwischen den Teilnehmern ausgetauscht werden. Daher liegt der Kommunikation ein Zustandsmodell zugrunde, so dass immer in einer festen Reihenfolge alle benötigten Daten ausgetauscht werden. Liegt ein Paketverlust vor, so wird das zu erwartende Paket solange gesendet, bis der korrekte Empfang bestätigt wurde. Ebenso wird das Zustandsmodell nur vor der Bildung eines Konvois, bzw. wenn ein neues Fahrzeug zum Konvoi dazu kommt, abgearbeitet. Während einer Konvoi-fahrt behält der ausgehandelte Datensatz seine Gültigkeit.

Um dies zu gewährleisten, wird sowohl für die ausgehenden als auch für die eingehenden Datenpakete jeweils ein Speicher, in Bild 3.10 PKT\_QUEUE genannt, eingesetzt. Dort werden die zu sendenden Pakete in einer festen Reihenfolge abgelegt und nacheinander nach dem zuvor beschriebenen Verfahren versendet. Ebenso werden alle korrekt empfangenen Pakete in der richtigen Reihenfolge abgelegt. Der Empfang eines bestimmten Paketes initiiert dann das Versenden des korrespondierenden Pakets.

In Bild 3.14 ist ein Sequenzdiagramm zur Koordination eines Konvois dargestellt. Der Konvoi besteht zunächst aus zwei Fahrzeugen. Bevor ein weiteres Fahrzeug sich dem Konvoi anschließen kann, teilt es dem Koordinator seine relevanten Parameter mit. Anhand dieser Daten entscheidet der Koordinator ob der Konvoibetrieb mit diesem RailCab sinnvoll ist. Ist dies der Fall, so werden die Konvoiparameter (vorausfahrendes und nachfolgendes Fahrzeug, Sollgeschwindigkeit, maximale Beschleunigung, Zeitverzögerung bei Schnellbremsungen) allen beteiligten Fahrzeugen mitgeteilt. Erst nach Bestätigung des Empfangs sind die neuen Parameter wirksam und das Fahrzeug darf zum Konvoi aufschließen.



**Bild 3.14 UML-Sequenzdiagramm (Ausschnitt) zur Konvoikoordination [HTS+08a]**

Die Koordinationsphase beinhaltet das Aushandeln der im Konvoi zugelassen maximalen Beschleunigung  $a_{M,max}$  sowie der maximalen Fahrgeschwindigkeit  $v_{M,max}$ :

$$a_{M,max} = \text{Min} \{ a_{Mn,max} \} \quad n \in \{1..N\} \tag{3.3}$$

$$v_{M,\max} = \text{Min} \{v_{Mn,\max}\} \quad n \in \{1..N\} \quad (3.4)$$

Mit:  $N = \text{Anzahl der Fahrzeuge}$

Eine Voraussetzung für den sicheren und stabilen Betrieb eines Fahrzeugkonvois mit geringen Fahrzeugabständen (Forderung: Sollabstand geringer als ein Meter) ist, dass alle Fahrzeuge die gleiche Fahrdynamik erreichen können. Daher werden die Parameter nach Gl. 3.3 und Gl. 3.4 für alle Fahrzeuge verbindlich festgelegt. Darüber hinaus werden auch fahrzeugspezifische Parameter ausgetauscht, wie z. B. Bremsverzögerungen  $\Delta T_{\text{SB}}$  bei Schnellbremsungen:

$$\Delta T_{\text{SB}n+1} = \sum_1^n \Delta T_{\text{SB}n} + \Delta T_{\text{SB}n+1,n} \quad (3.5)$$

Diese hängt ab von der individuellen Fahrzeugmasse  $m_{\text{RC}n}$  in Relation zur Bremskraft der Schnellbremseinrichtung (zusätzliche mechanisch wirkende Bremse)  $F_{\text{SB}n}$ . Der Wert wird kommuniziert über die Schnellbremsverzögerung  $a_{M,\text{SB}n}$ :

$$\Delta T_{\text{SB}n+1,n} = \frac{v_{Mn+1}}{a_{M,\text{SB}n+1}} - \frac{v_{Mn}}{a_{M,\text{SB}n}} \quad (3.6)$$

Zusätzlich zu diesen Parametern erhalten die Fahrzeuge noch die Informationen, welches Fahrzeug vorausfährt und welches Fahrzeug folgt.

### 3.3 Identifikation der Fahrzeugposition

Die RailCabs benötigen eine Positionsidentifikation sowie eine Erkennung der Fahrzeugbewegung, um sich auf dem Schienennetz autonom bewegen zu können. Dazu werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt, um eine redundante Positionserfassung zu gewährleisten. Die Positionsidentifikation sollte zudem kurzfristige Störungen und Teilausfälle tolerieren oder zumindest erkennen.

#### 3.3.1 Messung mittels Inkrementalgebern und Referenzmarken

Ein Verfahren stellt die Positionserfassung mittels in den Radnaben aller vier Räder integrierter Inkrementalenoder dar [Pot06]. Bei diesem Verfahren werden die Umdrehungen der Räder gemessen und so zu dem zurückgelegten Weg aufintegriert. Aufgrund von Spurkranzanläufen kommt es jedoch unvermeidbar zu durchaus größeren Messfehlern. Aus diesem Grund werden die Sensorsignale durchgehend auf Plausibilität und Qualität geprüft. Resultat dieser Plausibilitätsprüfung ist zudem, dass von den vier zur Verfügung

stehenden Sensorwerten stets die beiden besten Werte berücksichtigt werden. Zudem sind im Abstand von ca. 15 m entlang der Strecke Referenzmarken angebracht, die zentimetergenau vermessen und auf einer digitalen Streckenkarte der Versuchsanlage eingetragen sind. Diese Marken werden mittels induktiver Näherungsschalter erfasst und so die Position auf den jeweiligen Wert abgeglichen. Wie Tabelle 3.7 zeigt, beträgt so die Messgenauigkeit max. ca. 20 cm. Diese Genauigkeit erlaubt also folgendermaßen eine relativ genaue Positionierbarkeit der Fahrzeuge.

**Tabelle 3.7 Messung der Absolutposition (Auszug)**

Marke	Position in m	Messfehler in m
1	25,385	-0,02
2	40,365	-0,09
3	55,975	+0,01
4	71,005	-0,16
5	85,890	-0,07
6	100,300	-0,04
7	114,635	+0,05
8	161,605	-0,10

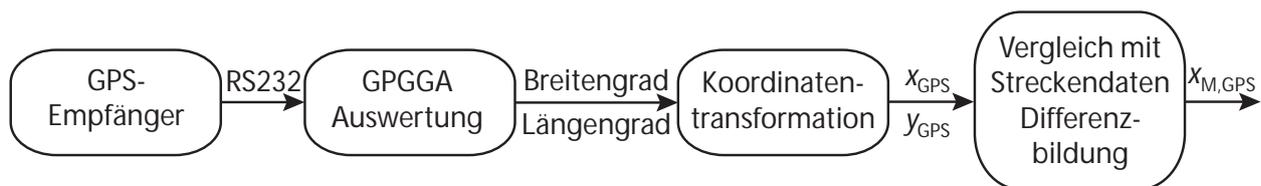
### 3.3.2 GPS Messung

Eine Möglichkeit zur Erfassung der Absolutposition ohne Systeminitialisierung ist der Einsatz eines Global Positioning Systems (GPS). Dies ist ein globales Navigationssatellitensystem zur Erfassung von Position und Zeit. GPS-Geräte empfangen dabei nur Informationen und senden selber keine Daten aus. Es wird eine Verbindung zu möglichst vielen Satelliten benötigt, um eine hohe Genauigkeit zu erzielen.

Eingesetzt wird ein GPS-Gerät vom Typ Navilock NL-403p [Nav11]. Dieser Empfänger verfügt über eine Update-Rate der ermittelten Position von 4 Hz. Die Taktzeit beträgt 1  $\mu$ s in Bezug zur GPS-Zeit. Der Empfänger gibt den Längen- und Breitengrad sowie die Anzahl der aktuell empfangenen Satelliten und eine Angabe über die horizontale Genauigkeit aus. Die Genauigkeit dieses GPS-Geräts wird mit 2,5 m CEP angegeben, bezogen auf das sogenannte 50 % CEP (Circular Error Probable) [Gur91]. Diese Angabe ist so zu interpretieren, dass sich 50 % aller Messungen in einem Kreis mit dem angegebenen Radius

von 2,5 m befinden. Weiterhin befinden sich 95 % aller Messpunkte innerhalb eines Kreises mit dem doppelten angegebenen Radius und 98,9 % der Messungen in einem Kreis mit dem 2,55-fachen Radius. Folglich befinden sich nahezu alle Messpunkte in einem Kreis mit etwa 6,375 m Radius. Zur Erzielung dieser Genauigkeiten wird jedoch ein optimaler Empfang vorausgesetzt. Mit abnehmender Anzahl gegenwärtig empfangener Satelliten nimmt die Ungenauigkeit weiter zu. Dies wird insbesondere durch Abschattungen oder Reflexionen der Satellitensignale oder aber auch durch atmosphärische Effekte bedingt.

Das durch das GPS-Gerät empfangene GPGGA-Protokoll wird über eine serielle RS232-Schnittstelle an den Fahrzeugrechner weitergeleitet. In diesem Protokoll sind neben einer Startkennung die GPS-Zeit, Breitengrad, Längengrad, die Anzahl der empfangenen Satelliten sowie eine Angabe zur horizontalen Genauigkeit (HDOP) enthalten. Die Verarbeitung der GPS-Daten ist in Bild 3.15 dargestellt.



**Bild 3.15** Verarbeitung der GPS-Daten

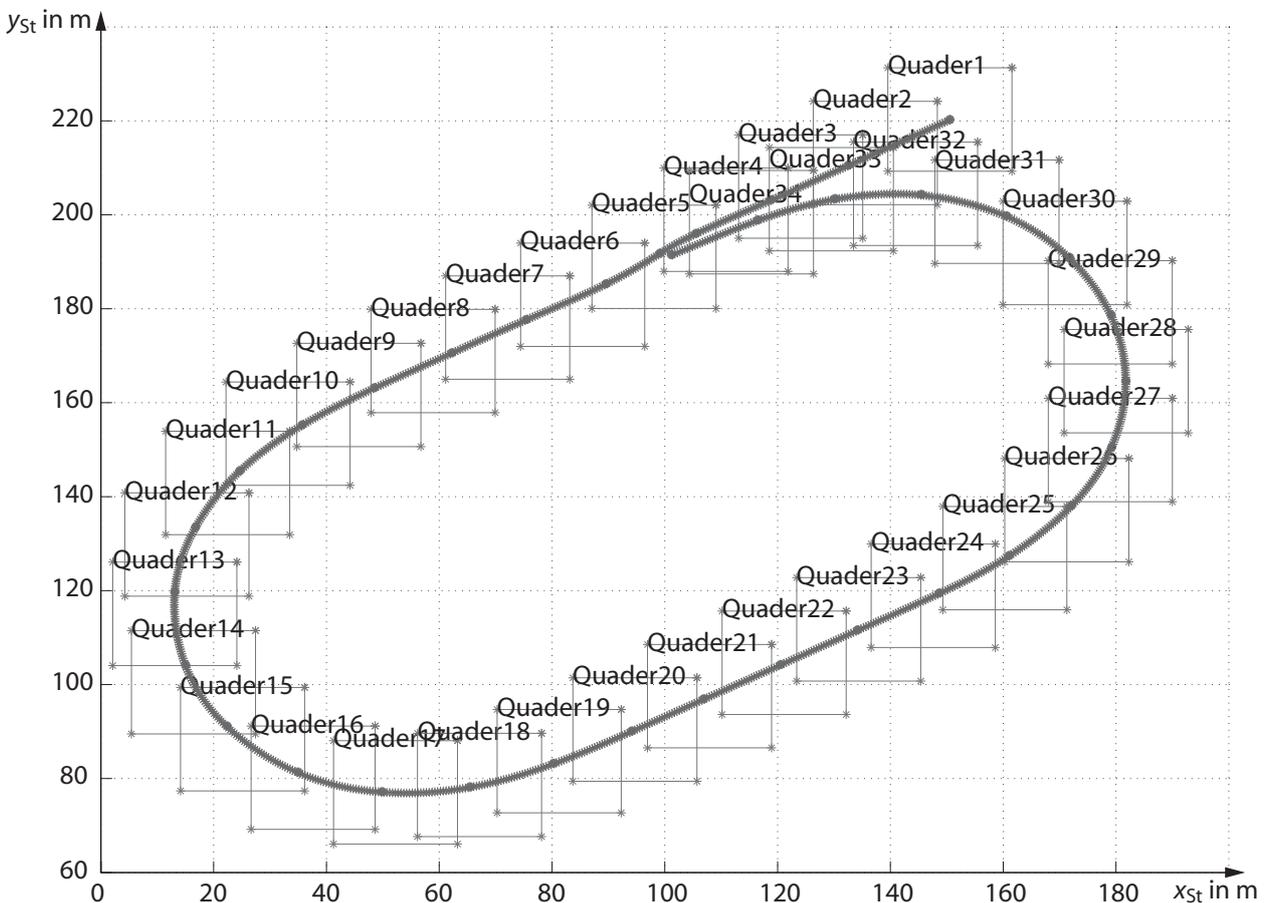
Aus den geografischen Koordinaten (Breiten- und Längengrad) werden zunächst  $x$ ,  $y$ -Koordinaten (Gauß-Krueger-Koordinaten –  $x_{GPS}$ ,  $y_{GPS}$ ) transformiert [Fla03]. Für die NBP-Versuchsstrecke sind exakte Positionsdaten bekannt. So existieren zentimetergenau vermessene Referenzmarken (vgl. Kap. 3.3.1 und Tab. 3.7) die durch das Vermessungsamt ermittelt worden sind. Anhand dieser Daten lässt sich ein zweidimensionales Streckenmodell in  $x$ ,  $y$ -Koordinaten ( $x_{St}$ ,  $y_{St}$ ) generieren. Diese Daten werden wiederum in die eindimensionale Größe der Wegstrecke  $x_{M,GPS}$  transformiert. Aufgrund der geringen Genauigkeit des GPS und zur Reduzierung der Datenmengen ist in der GPS-Auswertung die Wegstrecke auf 0,5 m quantisiert. Die Daten sämtlicher Streckenpunkte sind in einer Wertetabelle hinterlegt. Folglich existiert eine Zuordnung zwischen den Koordinaten  $x_{St}$ ,  $y_{St}$  und der Wegstrecke  $x_{M,GPS}$ .

Die empfangenen Positionsdaten decken sich aufgrund von Messungenauigkeiten nicht unmittelbar mit den Daten der Versuchsstrecke, so dass eine Projektion der GPS-Positionsdaten auf die Versuchsstrecke erforderlich ist. Dazu ist die Versuchsstrecke in 34 Räume (hier als Quader bezeichnet) eingeteilt, die jeweils eine Länge von 22 m und eine Breite von 22 m haben (siehe Bild 3.16). Die Bereichsunterteilung ist erforderlich, um zunächst die ermittelte GPS-Position grob auf die Versuchsstrecke zu projizieren. Anschließend wird mittels eines Suchverfahrens die Streckenposition genauer ermittelt.

Die Größe der Bereiche resultiert aus einem Kompromiss zwischen benötigter Rechenzeit des eingesetzten Suchverfahrens und der Quantisierungsgenauigkeit.

Folglich wird anhand einer Positionsangabe des GPS der korrespondierende Quader bestimmt. Kann die Position keinem Quader zugeordnet werden, liegt ein Messfehler vor bzw. ist die Ungenauigkeit zu groß. Kann hingegen die Position einem Quader zugewiesen werden, wird der nächstgelegene Streckenpunkt ( $x_{St}$ ,  $y_{St}$ ) gesucht, aus dem dann wiederum die Wegangabe ( $x_{M,GPS}$ ) bestimmt werden kann.

Mit einem Suchverfahren werden daher zunächst die Differenzen der Messposition ( $x_{GPS}$ ,  $y_{GPS}$ ) zu allen Streckenpositionen ( $x_{St}$ ,  $y_{St}$ ) des jeweiligen Quaders bestimmt. Der Streckenpunkt mit der niedrigsten Differenz wird als Messpunkt angenommen. Auf diese Weise kann der Positionsfehler erheblich reduziert werden.

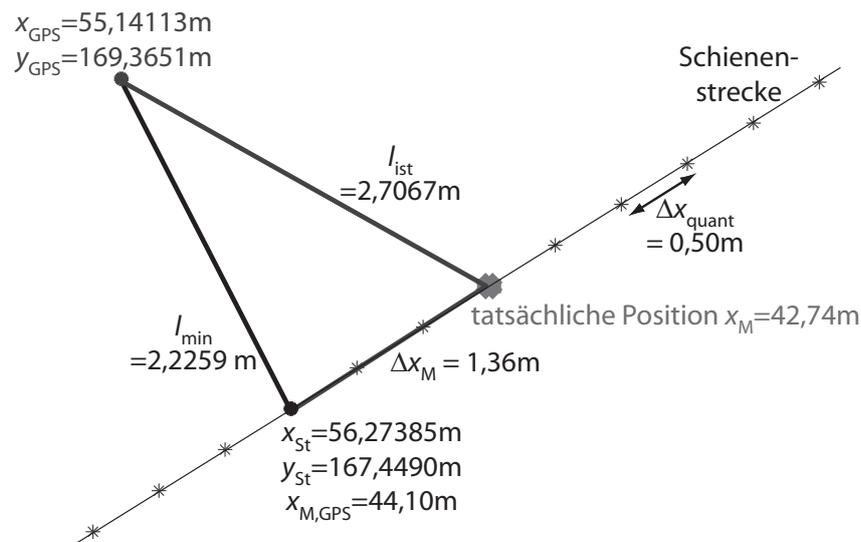


**Bild 3.16** Unterteilung der Versuchsstrecke

Bild 3.17 zeigt beispielhaft eine gemessene Position während einer Testfahrt. Zunächst wird eine Position per GPS empfangen und in die Koordinaten  $x_{GPS}$ ,  $y_{GPS}$  umgerechnet. Anschließend wird der nächstgelegene Streckenpunkt  $x_{St}$ ,  $y_{St}$  ( $l_{min}$ ) ermittelt. In dem vorliegenden Fall reduziert sich der Messfehler, der ursprünglich 2,71 m ( $l_{ist}$ ) beträgt, auf 1,36 m ( $\Delta x_M$ ). Für die vorliegende Schienenverkehrs-anwendung kann folglich die Genau-

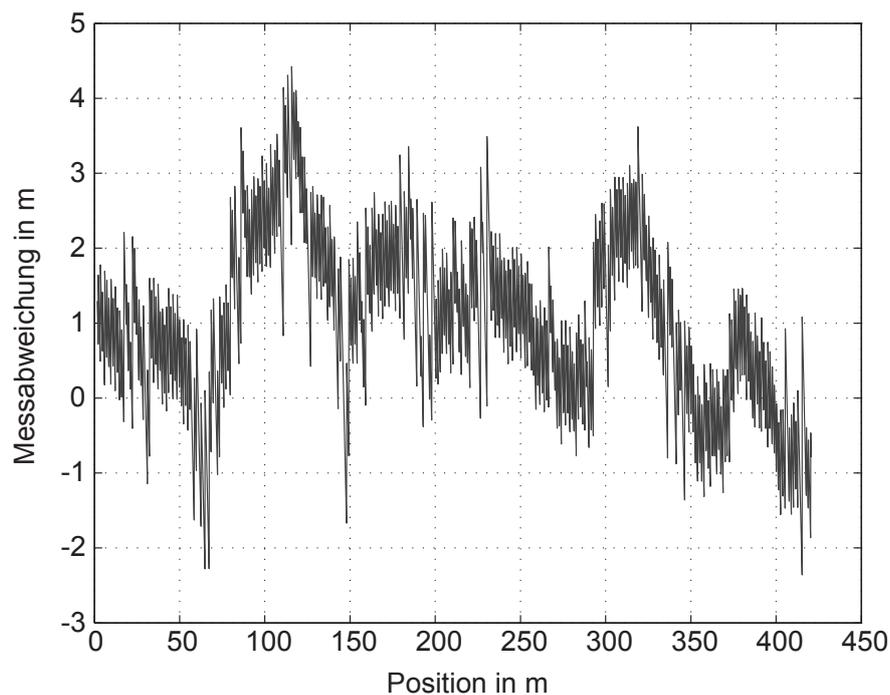
igkeit der GPS-Messung zusätzlich erhöht werden, indem die Messpunkte des GPS auf die ortsfeste Schienenstrecke projiziert werden.

Das GPS kann zwar im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Verfahren eine Absolutposition bestimmen, allerdings ist das Messsystem verhältnismäßig unpräzise. Weiterer Nachteil dieses Systems ist, dass die Messrate mit 4 Hz sehr gering ist. Daher eignet sich dieses Messverfahren nur für eine Initialisierung der Wegmesssysteme sowie für einen Positionsabgleich.



**Bild 3.17** Positionsbestimmung auf der Versuchsstrecke

In Bild 3.18 sind GPS-Messdaten einer Testfahrt auf der Versuchsanlage dargestellt.



**Bild 3.18** Positionsfehler der GPS-Messung auf der Versuchsstrecke

In der oberen Darstellung ist die Messabweichung des GPS gegenüber der mittels Inkrementalgebern und Referenzmarken (vgl. Kap. 3.3.1) ermittelten absoluten Position aufgetragen. Aufgrund der Projektion der GPS-Daten auf die festen Koordinaten der Versuchsanlage und unter Berücksichtigung eines abgelegten Korrekturvektors resultieren für ein GPS-System verhältnismäßig geringe Abweichungen.

### 3.3.3 Bestimmung der Absolutposition

Die beiden zuvor vorgestellten Verfahren zur Positionsbestimmung weisen sehr konträre Eigenschaften auf. So bietet die Messung mittels Inkrementalgebern und Referenzmarken eine sehr hohe Messgenauigkeit. Die Referenzmarken korrespondieren zwar mit absoluten Positionen, sind aber nur relativ messbar, da die Marken keine Codierung aufweisen. Folglich funktioniert das Messverfahren nur nach erfolgter Systeminitialisierung bzw. solange das System „in Tritt“ bleibt. Im Gegensatz dazu liefert das GPS durch die geringe Messrate eine schlechte zeitliche Auflösung und zudem noch relativ unpräzise Messwerte. Dafür ist aber eine absolute Positionsidentifikation gegeben, so dass sich dieses Messsystem für einen Positionsabgleich und für eine Initialisierung eignet. Die resultierende Struktur der Positionsbestimmung, die die Vorteile beider Erfassungssysteme miteinander vereint, ist in Bild 3.19 dargestellt.

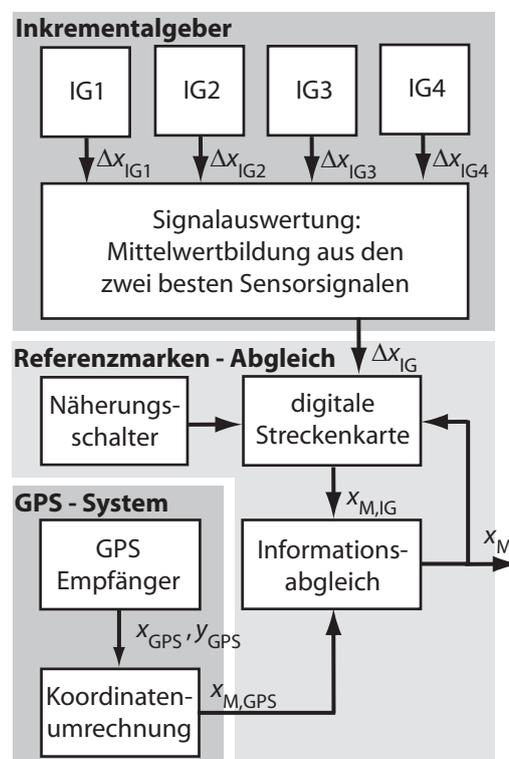


Bild 3.19 Strukturbild der Positionsbestimmung

Das Messsystem bestehend aus Inkrementalgebern und Referenzmarkendetektion liefert kontinuierlich Positionswerte. Diese werden mit denen des GPS-Empfängers verglichen. Bei zu großen Abweichungen werden die GPS-Daten verwendet, um das andere Messsystem wieder „in Tritt“ zu bringen. Das dargestellte Positionsbestimmungssystem erfüllt damit die Anforderungen für die autonome Konvoifahrt.

### **3.4 Sicherungstechnik**

Ein autonomes Transportsystem erfordert neben einer zuverlässigen Betriebsleittechnik auch eine umfangreiche Sicherungstechnik. Von besonderer Bedeutung sind dabei das selbsttätige Erkennen von Systemgefahren und eine damit einhergehende Möglichkeit der uneingeschränkten Systemreaktion. So kann das System Gefahrensituationen eigenständig erkennen und Notfallmaßnahmen einleiten. Hinsichtlich der Sicherungstechnik wird zwischen fahrzeugseitiger und fahrwegseitiger Sicherung unterschieden [Pac08]. Die fahrzeugseitige Sicherung beinhaltet dabei alle Einrichtungen, die sich auf den Fahrzeugen befinden und Einfluss auf die Fahrbewegung nehmen. Zur Fahrwegsicherung zählen alle streckenseitig angeordneten Einrichtungen, die zur Überwachung und auch zur Steuerung der Fahrzeuge dienen.

Nachfolgend werden zunächst die auf der Versuchsanlage installierten Sicherungseinrichtungen beschrieben, die für einen sicheren Betrieb erforderlich sind. Aufbauend darauf werden die fahrzeugseitige und die fahrwegseitige Sicherungstechnik erläutert.

#### **3.4.1 Installierte Sicherungseinrichtungen**

##### **Systemanforderungen**

Bei sicherheitsgerichteten Systemen kann die Zuverlässigkeit und Sicherheit erhöht werden, indem das System redundant statt einfach strukturiert aufgebaut wird [Bör07]. Daher sind Modellkonstruktionen zu wählen, so dass auch im Fehlerfall ein sicherer Systembetrieb gewährleistet werden kann. Nach Möglichkeit sind Systeme dabei mit diversitärer Redundanz zu versehen. Dies bedeutet eine Redundanz mit ungleichartigen Mitteln [Bör06].

Beim Entwurf des Sicherheitskonzeptes für die NBP-Versuchsanlage müssen Möglichkeiten der Zustandsüberwachungen und des äußeren Eingriffs bereits berücksichtigt werden. Zudem ist ein redundant ausgelegtes Sicherheitssystem zwingend erforderlich, um

trotz des Ausfalls einer Systemkomponente über weitere Analyse und Eingriffsmöglichkeiten zu verfügen. Im Falle der räumlich begrenzten Anlage sind generell folgende Eingriffsmöglichkeiten zu gewährleisten:

- Forderung 1: Aus dem Leitstand muss sich jedes Fahrzeug zu jeder Zeit sicher stoppen lassen. Dies muss manuell durch Bedieneingriffe und auch automatisch durch Streckenüberwachungsfunktionen möglich sein.
- Forderung 2: Eine Betätigung eines Notausschalters an der Versuchsanlage muss einen sicheren Stopp der Fahrzeuge zwingend hervorrufen.
- Forderung 3: Jedes Fahrzeug muss autark in der Lage sein, bestehende Gefahren, die sich aus der eigenen Fahrbewegung und anderer in der Nähe befindlicher Fahrzeuge ergeben, sicher zu erkennen und darauf reagieren zu können.

Diese Forderungen sind zunächst unabhängig von der jeweiligen Fahrsituation zu sehen und müssen generell erfüllt werden.

### **Implementierung an der Versuchsanlage**

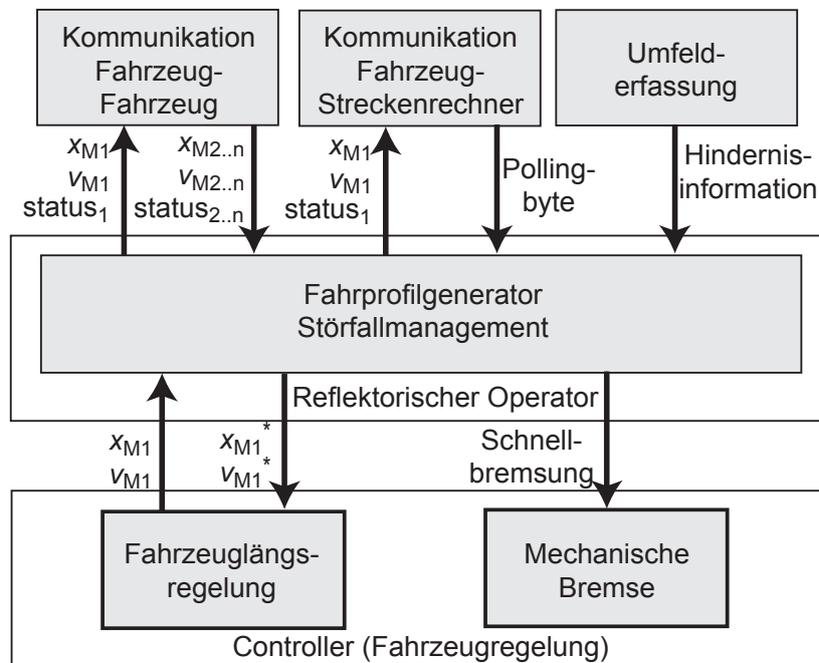
Der Zugriff des Bedieners vom Leitstand auf die Fahrzeuge erfolgt über einen Remote-Desktop Zugriff, der über eine WLAN-Verbindung hergestellt wird (vgl. Kap. 3.1.1). Dieser Zugriff muss als sehr unsicher angesehen werden, da eine gute Verbindungsqualität nicht immer gegeben ist und ein Funkausfall auch über einen längeren Zeitraum jederzeit auftreten kann. Allerdings ist in der Funkverbindung zwischen Fahrzeug- und Streckensteuerung ein Kommunikationsprotokoll integriert, das die Verfügbarkeit und Qualität der Verbindung kontinuierlich überwacht. Da wie in Kap. 3.2 bereits beschrieben, ein Ausfall der Verbindung sicher erkannt werden kann, lässt sich damit vom Leitstand über die Streckensteuerung die Anforderung einer Schnellbremsung an das Fahrzeug zuverlässig übermitteln, so dass Forderung 1 damit erfüllt wird. Die Anforderung kann entweder manuell vom Bediener ausgelöst werden oder aber automatisch, von der Streckensteuerung ausgehend, geschehen.

Durch das Drücken eines Notausschalters auf der Versuchsanlage wird die streckenseitige Kommunikationseinrichtung ausgeschaltet, was dann wiederum fahrzeugseitig als Funkverbindungsabbruch erkannt wird. Das Fahrzeug reagiert dann mit einer Schnellbremsung, so dass damit Forderung 2 erfüllt wird.

Forderung 3 hingegen erfordert neben der physikalischen Verfügbarkeit eines externen manuellen Fahrzeugzugriffs die Implementierung eines autonom agierenden Sicherheitssystems. Hierfür muss zwangsläufig jedes Fahrzeug über die Möglichkeit verfügen, be-

kannte, vordefinierte Gefahren sicher erkennen und angemessene Reaktionen durchführen zu können. Dazu sind Informationen notwendig, die auch für die Längsdynamikregelung erforderlich sind: die detaillierten Daten über die aktuelle Position und Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs. Um potenzielle Gefahrensituationen mit anderen Fahrzeugen zu vermeiden, müssen diese Informationen auch von anderen in der Nähe befindlichen Fahrzeugen zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich bietet der Einsatz Umfeld erfassender Sensorik die Möglichkeit, Fahrzeuge zu detektieren.

Die Sicherheitsroutinen, die innerhalb der autonomen Fahrzeugführung angesiedelt sind, müssen redundant ausgeführt sein, um auch bei Ausfällen sichere Fahrmanöver durchführen und das System in einen sicheren Zustand überführen zu können. Das entwickelte Sicherheitskonzept ist in Bild 3.20 dargestellt.



**Bild 3.20** Sicherheitskonzept eines RailCab-Fahrzeugs auf der Versuchsanlage

Im reflektorischen Operator des OCM werden die Systeminformationen ausgewertet. Neben dem Fahrprofilgenerator existiert ein Störfallmanagement, so dass entsprechende Fahrbefehle generiert und auch eine Schnellbremsung initiiert werden können. Die benötigten Informationen werden von den Funktionsgruppen Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation, Fahrzeug-zu-Strecke-Kommunikation und Umfelderkennung bereitgestellt, so dass Redundanz gegeben ist.

Um stets einen sicheren Fahrzeughalt realisieren zu können, verfügen die Fahrzeuge zusätzlich über eine mechanisch wirkende Schnellbremseinrichtung, die in den Hydraulikkreis der Fahrzeuge integriert ist. Diese Bremse ist selbsthemmend konstruiert, so

dass bei einem kompletten Systemabbruch oder bei einem Fehler im Hydraulikkreis ebenfalls ein Auslösen hervorgerufen wird.

### 3.4.2 Fahrzeugseitige Sicherungstechnik

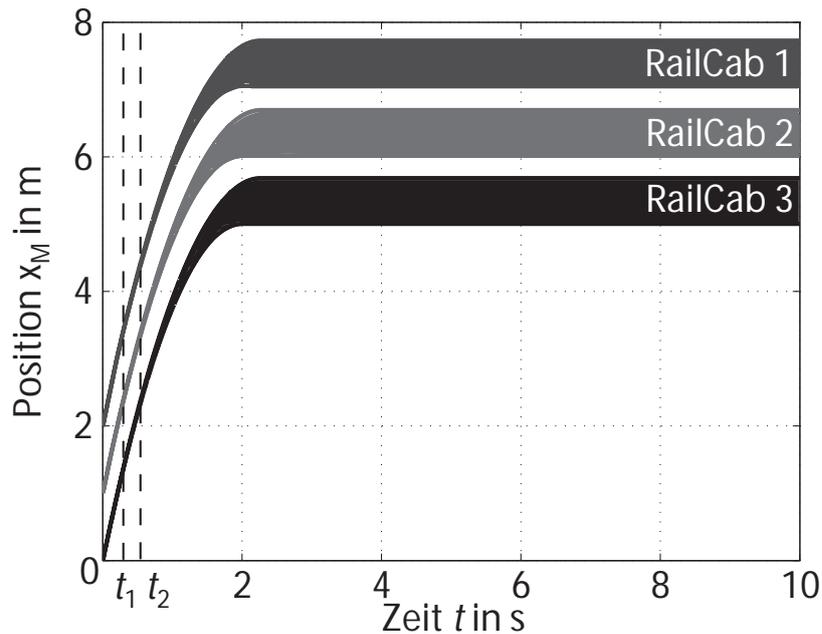
Die Fahrzeugsicherung geschieht dezentral durch jedes Fahrzeug und umfasst folgende Bereiche:

- Positionsidentifikation,
- Bestimmung der aktuellen Fahrtrichtung und Geschwindigkeit,
- Überwachung zulässiger Geschwindigkeiten,
- Überwachung der Bremskurven,
- Umfeldüberwachung.

Aus der zuvor beschriebenen Positionsbestimmung der RailCabs können ebenso Fahrtrichtung und Geschwindigkeit bestimmt werden. Wie bereits beschrieben, ist eine hinreichende Genauigkeit und Ausfallsicherheit vorhanden, um sicherheitsrelevante Bewertungen vornehmen zu können. Unter Zuhilfenahme der digitalen Streckenkarte (vgl. Kap. 3.3), die auch Informationen über abschnittsweise definierte Höchstgeschwindigkeiten enthält, können zudem zulässige Geschwindigkeitsbereiche überwacht werden.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Bahnen [Sch07] findet beim RailCab-System keine Blockbildung statt. Da sich die Fahrzeuge zudem noch im relativen Bremswegabstand und darunter bewegen sollen, kommt der Überwachung der Bremskurven eine besonders große Bedeutung zu. Diese Bremskurven werden von jedem Fahrzeug anhand seiner gegenwärtigen Position und Geschwindigkeit sowie der übermittelten Daten der übrigen Fahrzeuge im Konvoi berechnet. Anhand der Bremskurven werden die erforderliche Sollabstände und Sollgeschwindigkeiten ermittelt. Beispielhafte Verläufe für diese Bremskurven sind in Bild 3.21 dargestellt.

Aus den Bremskurven ergeben sich Bremskorridore, wenn beispielsweise im Falle einer Schnellbremsung variierende Reibkoeffizienten der mechanischen Bremseinrichtung vorausgesetzt werden müssen. Sind die Bremskorridore bekannt oder können diese abgeschätzt werden, so lassen sich daraus die erforderlichen Auslöseverzögerungen der Bremseinrichtungen errechnen (vgl. Kap. 3.2.3, Gl. 3.6).



**Bild 3.21** Beispielhafte Verläufe von Bremskurven eines RailCab-Konvois bei einer Schnellbremsung

### Umfeldüberwachung

Der autonome Betrieb der RailCabs erfordert eine Umfeldüberwachung, die mittels Sensoren erfolgt. Prinzipiell sollte eine Überwachung über den Bereich des absoluten Bremswegs möglich sein, um auch bei starren Hindernissen stets rechtzeitig bremsen zu können. Folglich ergibt sich eine erforderliche Messdistanz  $d_{\text{mess}}$ , die abhängig ist von der Ansprechzeit  $\Delta T$  der eingesetzten Sensorik:

$$d_{\text{mess}} = v_M \cdot \Delta T + \frac{v_M^2}{2 \cdot a_M} \quad (3.7)$$

Problematisch wirkt sich allerdings auf der Versuchsanlage aus, dass aufgrund der geringen Kurvenradien ein weiter Öffnungswinkel für das Sensorsystem bei großen Entfernungen erforderlich ist.

Da auf der Versuchsanlage nicht von Hindernissen auf der Strecke auszugehen ist, ist eine Sensortechnik lediglich zur Kollisionsvermeidung zwischen den beiden Versuchsfahrzeugen erforderlich. Da die Fahrzeuge sowohl der Strecke als auch untereinander ihre aktuellen Positionen quasi-kontinuierlich mitteilen, ist für die Versuchsanlage der Ansatz gewählt worden, nur eine Nahbereichssensorik einzusetzen.

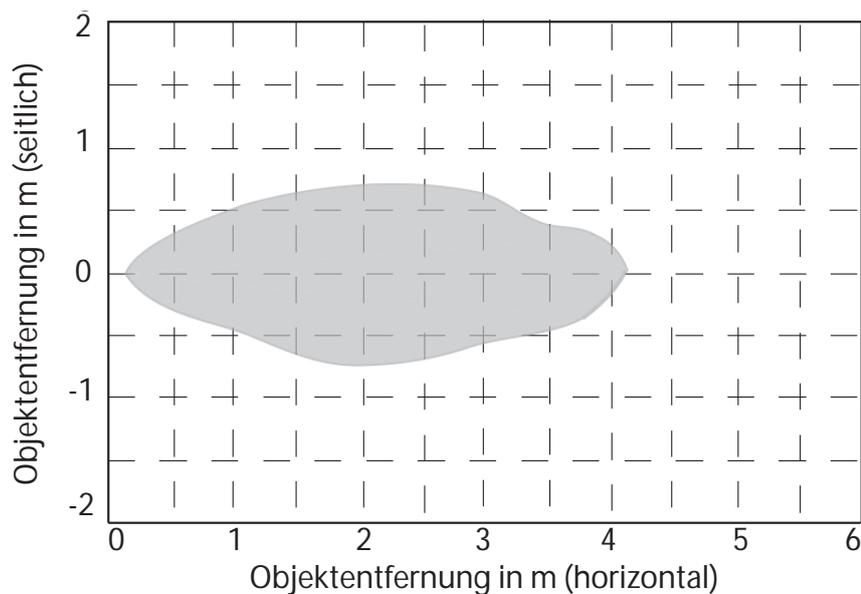
Zur Erfassung des unmittelbaren Fahrzeugumfeldes werden jeweils an Vorder- und Rückseite des Fahrzeugs Ultraschallsensoren vom Typ Welotec UWP 015-400 einge-

setzt. Diese verfügen über einen Messbereich von ca. 0,15 m bis 4,0 m und eine Reaktionszeit  $\Delta T_{\text{USS}}$  von weniger als 100 ms. Die Wiederholrate des Sensors liegt bei wenigen Millisekunden. In Bild 3.22 ist die gemessene charakteristische Ansprechkurve (Näherung) des verwendeten Sensors zu sehen. Die Breite der Schallkeule reicht bei einer Messdistanz von 4 m zur Erkennung eines RailCabs aus.

Mit der maximalen Reichweite des Ultraschallsensors  $d_{\text{USS,max}}$ , der Ansprechzeit des Sensors  $\Delta T_{\text{USS}}$  und der jeweiligen Bremsverzögerung  $a_{\text{M}}$  lässt sich die maximal tolerierbare Differenzgeschwindigkeit  $\Delta v_{\text{max}}$  zum Hindernis bestimmen:

$$d_{\text{USS,max}} = \Delta v_{\text{M,max}} \cdot \Delta T_{\text{USS}} + \frac{\Delta v_{\text{M,max}}^2}{2 \cdot a_{\text{M}}} \quad (3.8)$$

$$\Delta v_{\text{M,max}} = a_{\text{M}} \cdot \Delta T_{\text{USS}} + \sqrt{a_{\text{M}}^2 \cdot \Delta T_{\text{USS}}^2 + 2 \cdot a_{\text{M}} \cdot d_{\text{USS,max}}} \quad (3.9)$$



**Bild 3.22** Charakteristische Ansprechkurve Ultraschallsensor Welotec UWP 015-400

In Tabelle 3.8 sind für verschiedene Werte der Bremsverzögerung die resultierenden maximalen Differenzgeschwindigkeiten zu dem jeweiligen Hindernis angegeben. Bei den dargestellten Differenzgeschwindigkeiten kann jeweils ein rechtzeitiger Halt vor dem Hindernis gewährleistet werden.

Folglich reicht diese Sensorik zwar nicht aus, um plötzlich auftauchende Hindernisse auch bei höheren Fahrgeschwindigkeiten frühzeitig erkennen zu können. Jedoch sind bei einem Konvoimanöver die Differenzgeschwindigkeiten zwischen den Fahrzeugen beschränkt. So können beispielsweise bei fehlerbehafteter Positionserkennung und bei

Funkausfällen mit Hilfe des eingesetzten Ultraschallsensors Kollisionen vermieden werden.

**Tabelle 3.8** Differenzgeschwindigkeit in Relation zu Bremsverzögerungen

Bremsung	Bremsverzögerung $a_M$ in $\text{m/s}^2$	Maximale Differenzgeschwindigkeit $\Delta v_{M,\max}$ in m/s
Motorbremse (Weichenbereich)	0,3	1,58
Motorbremse (Gefälle)	0,5	2,06
Motorbremse (ebene Strecke)	0,7	2,44
Schnellbremsung	1,5	3,64

### 3.4.3 Fahrwegseitige Sicherungstechnik

Im Gegensatz zur Fahrzeugsicherung erfolgt die Fahrwegsicherung durch eine zentrale Stelle und umfasst folgende Aufgabenbereiche:

- Belegungsprüfung der Fahrwege,
- Kollisionserkennung von Fahrzeugen,
- Überwachung zulässiger Geschwindigkeiten,
- Überwachung der Bremskurven.

Da die Funktionsgruppe Streckenabschnittssteuerung von jedem Fahrzeug die genauen Positionsdaten benötigt, um eine Aktivierung der gegenwärtig benötigten Streckenabschnitte vornehmen zu können, können diese Informationen auch unmittelbar für Sicherungsfunktionen verwendet werden. Ebenso werden die Fahrzeuggeschwindigkeiten übermittelt (vgl. Bild 3.8), so dass damit bereits eine Belegungsprüfung der Fahrwege einhergehend mit einer Kollisionserkennung von Fahrzeugen basierend auf einer Überwachung der Bremskurven sowie der maximal zulässigen Fahrzeuggeschwindigkeiten durchgeführt werden kann. Wird eine unzulässige Betriebssituation erkannt, so kann über den sicheren Kommunikationsweg zwischen Streckensteuerung und Fahrzeug eine Notfallreaktion des Fahrzeugs umgehend und zuverlässig ausgelöst werden (vgl. Tab. 3.5).

## 4. Arbeitspunktsteuerung des Linearmotors im Konvoibetrieb

Wie in Kap. 2.3 bereits beschrieben wurde, erfolgt die Energieversorgung der Fahrzeuge über den doppelt gespeisten Linearmotor. Die Leistungsflüsse können mittels der Arbeitspunktsteuerung des Linearmotors innerhalb bestimmter Grenzen eingestellt werden und sind wesentlich vom gegenwärtigen Arbeitspunkt abhängig. Maßgebliche Größen hierzu sind Schubkraft und Fahrgeschwindigkeit. Wird ein einzelnes Fahrzeug betrieben, so kann der Arbeitspunkt, wie in [Pot06] ausführlich erläutert, individuell sowohl für den Läufer als auch für den Stator eingestellt werden.

Während des Konvoibetriebs mit geringen Fahrzeugabständen befahren mehrere Fahrzeuge den gleichen Statorabschnitt. Folglich liegt eine motorseitige Verkopplung der Fahrzeuge vor. In diesem Fall muss ein gemeinsamer Arbeitspunkt für den Stator gefunden werden, durch den Stromamplitude  $I_{sd}$  und Stromfrequenz  $\omega_s$  eindeutig festgelegt werden. Dieser Arbeitspunkt muss zwischen den Fahrzeugen per Funk ausgehandelt und kommuniziert werden, bevor er streckenseitig aufgeschaltet werden darf (vgl. Kap. 3.2.2).

In diesem Abschnitt werden zunächst die Verkopplungen und Wechselwirkungen zwischen Antrieb und Energiemanagement im Konvoibetrieb dargestellt sowie die Bedeutung der Konvoifahrt zur Steigerung des Wirkungsgrades des Linearmotors erläutert. Zudem wird die Realisierung der Arbeitspunktsteuerung auf der Versuchsanlage beschrieben. Darüber hinaus ist im Energiemanagement der Fahrzeuge eine Entscheidungsheuristik zur Arbeitspunktvergabe implementiert, um für alle Betriebsfälle eine eindeutige Arbeitspunktvergabe erzielen zu können. Ferner wird in diesem Kapitel die Leistungsübertragung im Konvoibetrieb bei unterschiedlichen Betriebsarten untersucht.

### 4.1 Arbeitspunktvorgabe im Konvoibetrieb

Hinsichtlich des Arbeitspunktes des doppelt gespeisten Linearmotors existieren zwei Anforderungen. Dies ist einerseits die Schubkraft  $F_M$ , die individuell eingestellt wird, damit ein Fahrzeug der gewünschten Fahrprofilvorgabe folgen kann. Die Schubkraft ist daher

vor allem aus Gründen der Betriebssicherheit stets vorrangig zu behandeln und folgendermaßen definiert:

$$F_M = k_M \cdot I_{Sd} \cdot I_{Lq} \quad (4.1)$$

Werden nun mehrere Fahrzeuge auf dem gleichen Statorabschnitt betrieben, so kann eine Differenz hinsichtlich der Schubkraft nur durch einen individuellen Läuferstrom  $I_{Lqn}$  realisiert werden:

$$F_{Mn} = k_{Mn} \cdot I_{Sd} \cdot I_{Lqn} \quad (4.2)$$

Während des Konvoibetriebs sind geringe Abstände zwischen den Fahrzeugen wünschenswert, so dass mehrere Fahrzeuge den gleichen Statorabschnitt befahren. Befindet sich die Abstandsregelung der Fahrzeuge im eingeschwungenen Zustand, ergibt sich für alle beteiligten Fahrzeuge, dass die Fahrgeschwindigkeiten annähernd gleich sein müssen. Folglich werden Läufer- und Statorfrequenz als identisch angenommen:

$$\omega_S = \omega_{Ln} + \omega_{Mn} \approx \omega_L + \omega_M \quad (4.3)$$

Andererseits ist die geforderte Leistungsübertragung  $P_B$  zu beachten. Da die Schubkraft, wie zuvor beschrieben, priorisiert behandelt wird, besitzt die Leistungsübertragung lediglich zweite Priorität:

$$P_{Bn} = -3 \cdot (R_L \cdot I_{Lqn}^2 + \frac{\omega_L \cdot L_h}{\ddot{u}} I_{Sd} \cdot I_{Lqn}) \quad (4.4)$$

### Wirkungsgradoptimaler Konvoibetrieb

Der Linearmotor soll wirkungsgradoptimal betrieben werden. In [Pot06] wurde bereits eine wirkungsgradoptimale Arbeitspunktsteuerung für ein Einzelfahrzeug beschrieben. Da im Konvoibetrieb gemäß Gl. 4.2 und Gl. 4.4 weitere Freiheitsgrade zur Bestimmung des Arbeitspunktes als in [Pot06] bestehen, bedarf es einer erweiterten Betriebsstrategie zur Arbeitspunktvergabe, so dass einerseits die benötigten Schubkräfte sowie andererseits ein optimales Energiemanagement für den gesamten Konvoi ermöglicht wird.

Der Wirkungsgrad des doppelt gespeisten Linearmotors ist für das Antreiben bzw. Bremsen folgendermaßen definiert:

$$\eta_{An} = \frac{\sum_n (P_{Bn} + P_{Mn})}{P_S} \quad \eta_{Br} = \frac{\sum_n P_{Bn}}{P_S + \sum_n P_{Mn}} \quad (4.5)$$

Die Bordnetzleistung kann direkt als Summe der Einzelleitungen betrachtet werden:

$$P_{B,\text{sum}} = \sum_n P_{Bn} \quad (4.6)$$

Die Summe der mechanischen Leistung kann unter der zuvor getroffenen Annahme gleicher Fahrzeuggeschwindigkeiten als Summe der einzelnen Schubkräfte berechnet werden:

$$P_{M,\text{sum}} = v_M \cdot \sum_n F_{Mn} = v_M \cdot F_{M,\text{sum}} \quad (4.7)$$

Daraus resultieren folgende Berechnungsvorschriften für die Wirkungsgrade im antreibenden und bremsenden Fall:

$$\eta_{\text{An}} = \frac{\ddot{u} \tau_p k_M^2 I_{\text{Sd}}^2 (F_{M,\text{sum}} v_M + P_{B,\text{sum}})}{\ddot{u} \tau_p k_M^2 I_{\text{Sd}}^2 (3R_{\text{S,sum}} I_{\text{Sd}}^2 + P_{B,\text{sum}}) + 3k_L (\ddot{u} \tau_p R_L (F_M^2)_{\text{sum}} - \pi v_M L_h k_M F_{M,\text{sum}} I_{\text{Sd}}^2)} \quad (4.8)$$

$$\eta_{\text{Br}} = \frac{\ddot{u} \cdot \tau_p k_M^2 P_{B,\text{sum}} I_{\text{Sd}}^2}{\ddot{u} \tau_p k_M^2 I_{\text{Sd}}^2 (3R_{\text{S,sum}} I_{\text{Sd}}^2 + P_{B,\text{sum}} + F_{M,\text{sum}} v_M) + 3k_L (\ddot{u} \cdot \tau_p R_L (F_M^2)_{\text{sum}} - \pi L_h k_M v_M F_{M,\text{sum}} I_{\text{Sd}}^2)} \quad (4.9)$$

Der Parameter  $k_L$  beinhaltet die Summe der Läuferelemente pro Fahrzeug. Zur Bestimmung des wirkungsgradoptimalen Statorstroms muss für diese beiden Gleichungen jeweils das Extremwertproblem gelöst werden, so dass ähnlich wie in [Pot06] als Ergebnis resultiert:

$$I_{\text{Sd}} = \sqrt[4]{\frac{k_L \cdot R_L \cdot (F_M^2)_{\text{sum}}}{R_{\text{S,sum}} \cdot k_M^2}} \quad (4.10)$$

Unter Ausnutzung der Strom- und Spannungsgrenzen des Systems sind im wesentlichen Stator- und Läuferstrom optimal zu wählen. Damit ergibt sich wie bereits in [Pot06] beschrieben folgender Ablauf für die Arbeitspunktsteuerung:

1. Bestimmung der maximal angeforderten Schubkraft und Berechnung des damit verbundenen minimal zulässigen Statorstroms:

$$I_{\text{Sd,min}} = \frac{\text{Max}\{|F_{M,\text{max}}|\}}{k_M \cdot |I_{Lq,\text{max}}|} \quad (4.11)$$

2. Berechnung des Bereichs des Statorstroms (untere Grenze  $I_{\text{Sd,min}}$ ), mit dem die angeforderte Leistungsübertragung gewährleistet wird.
3. Bestimmung des Arbeitspunktes mit dem größtmöglichen Wirkungsgrad.

## Untersuchungen des Wirkungsgrads im Konvoibetrieb

Laut [Pot06] kann der eingesetzte doppelt gespeiste Linearmotor läuferseitig mit bis zu 23 A Stromamplitude betrieben werden. Die zulässige Statorstromamplitude liegt mit 155 A deutlich darüber. Bedingt durch die ohmschen Widerstände im Läufer ( $4 \cdot R_L = 2,44 \Omega$  je Fahrzeug) und im Stator ( $R_S = 0,98 \Omega$  je 6 m Streckenabschnitt) überwiegen insbesondere bei höheren Kraftanforderungen die ohmschen Verluste im Stator. Folglich hat die Anzahl der jeweils aktivierten Statorelemente einen entscheidenden Einfluss auf den Wirkungsgrad des Motors.

Im Vergleich zum Betrieb eines einzelnen Fahrzeugs ändert sich der Wirkungsgrad des Linearmotors im Konvoibetrieb maßgeblich, da sich das Verhältnis zwischen aktiv genutzter Statorfläche und der jeweils aktivierten Statorfläche zwangsläufig verändert. Dies bedeutet, dass der Statorwiderstand und damit einhergehend die Statorverluste bezogen auf jedes einzelne Fahrzeug geringer werden. Für eine Untersuchung des Wirkungsgrades ist es daher erforderlich, die tatsächlich benötigte mittlere Länge der zu aktivierenden Streckenabschnitte zu bestimmen.

### Bestimmung der benötigten Statorabschnittslänge

Der Wirkungsgrad des doppelt gespeisten Linearmotors wird bedingt durch die Kupferverluste im Stator. Diese sind proportional zur Länge des jeweils aktivierten Stators. Die Länge eines separat bestrombaren Statorabschnitts beträgt auf der NBP-Versuchsanlage 6 m. Wird ein Fahrzeug mit einer Länge  $l_{Fzg}$  von ca. 3,5 m betrieben, so reicht ein aktivierter Statorabschnitt nicht immer aus. Beim Übergang zum nächsten Abschnitt müssen folglich zwei Statorabschnitte eingeschaltet sein. Zur Bestimmung des Wirkungsgrades müssen daher unterschiedliche Parameter berücksichtigt werden:

- Fahrzeuglänge, Fahrzeuganzahl und Abstand zwischen den Fahrzeugen,
- Fahrgeschwindigkeit des Konvois,
- Latenzzeiten der Funkkommunikation zwischen Fahrzeug und Strecke (zur Übermittlung der Fahrzeugposition).

Die minimale aktive Statorlänge  $l_{\text{Stator, min}}$  für einen Konvoi, bestehend aus 2 Fahrzeugen jeweils mit der Länge  $l_{Fzg}$  und mit einem angenommenen Abstand von  $d = 1\text{m}$  zwischen den Fahrzeugen, beträgt:

$$l_{\text{Stator, min}} = 2 \cdot l_{Fzg} + d \approx 8\text{m} \quad (4.12)$$

Beim Übergang von einem Stator zum anderen müssen beide nebeneinander liegenden Statorabschnitte bestromt werden, dadurch ergibt sich eine zeitlich überlappende Stromversorgung an diesen beiden Abschnitten. Diese Überlappungsdauer  $T_{\bar{U}}$  kann berechnet werden unter Berücksichtigung der Abmessungen von Statorabschnitt und Fahrzeug, sowie der Latenzzeit der Kommunikation zur Aufschaltung der Statorsollwerte  $T_{TK} = 41,8 \text{ ms}$  (vgl. Kap. 3.2.2) und der maximalen Fahrgeschwindigkeit  $v_{M,\max}$  von  $10 \text{ m/s}$ . Diese Latenzzeit beinhaltet die Übermittlung der Fahrzeugposition und eine zusätzliche Zeitdauer von einem weiteren Sendezyklus der Leittechnik:

$$T_{\bar{U}} = \frac{l_{\text{Stator,min}}}{v_{M,\max}} + 2 \cdot T_{TK} = 883,6 \text{ ms} \quad (4.13)$$

Die relative Einschaltdauer eines Abschnitts  $D_S$  bezogen auf seine Abschnittslänge kann folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$D_S = \frac{l_{\text{Stator}} + 2 \cdot l_{\text{Fzg}} + d + 2 \cdot T_{TK} \cdot v_{M,\max}}{l_{\text{Stator}}} = 2,473 \quad (4.14)$$

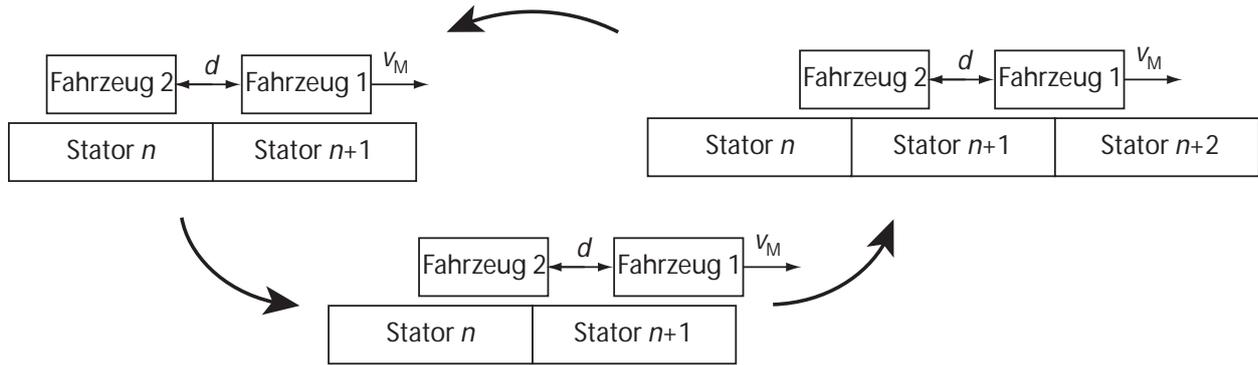
Die Statorlänge  $l_{\text{Stator}}$  beträgt  $6 \text{ m}$ . Der Faktor  $D_S$  bestimmt, wie lange ein Statorabschnitt mindestens eingeschaltet bleiben muss, damit über die getrennten Linearmotorteile eine Kraft aufgebaut werden kann. Dieser Faktor fließt in die Berechnung der Einschaltdauer eines Statorabschnittes folgendermaßen ein:

$$T_{\text{Stator,ein}} = D_S \cdot \frac{l_{\text{Stator}}}{v_{M,\max}} = 1,4838 \text{ s} \quad (4.15)$$

Mit  $D_S$  ergibt sich auch die mittlere zu bestromende Gesamtlänge:

$$\overline{l_{\text{Stator}}} = D_S \cdot l_{\text{Stator}} \quad (4.16)$$

Der Betrag des Statorwiderstandes ist folglich abhängig von dem Abstand  $d$  zwischen den Fahrzeugen, sowie der Fahrgeschwindigkeit  $v_M$ . Zunächst müssen für beide Fahrzeuge genauso wie im autonomen Fall jeweils bis zu zwei, d. h. insgesamt bis zu 4 Statorabschnitte geschaltet werden. Nähern sie sich einander an, kann die Anzahl der aktiven Statorelemente verringert werden. Bei einem Fahrzeugabstand von  $d = 1 \text{ m/s}$  müssen mindestens zwei und höchstens drei Statorelemente bestromt werden. Bild 4.1 verdeutlicht einen auftretenden Betriebsfall.

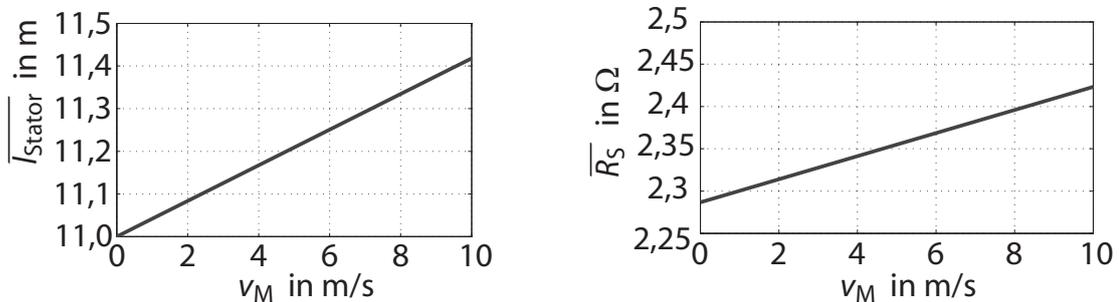


**Bild 4.1** Prinzip der Abschnittsaktivierung bei einer Konvoifahrt

Dadurch ergibt sich für den mittleren Statorwiderstand mit dem Widerstand  $R_S = 0,98 \Omega$  eines einzelnen Statorabschnitts:

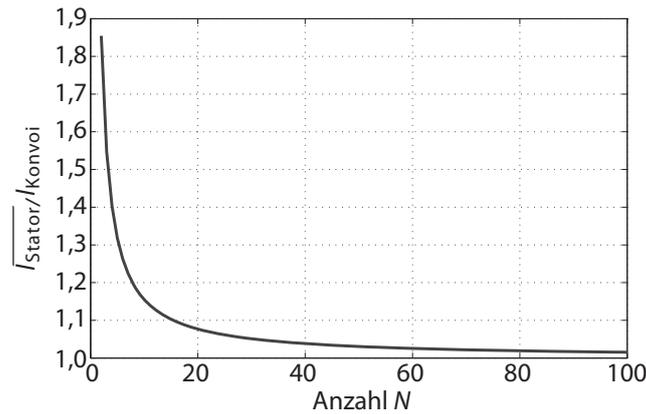
$$\overline{R_S} = D_S \cdot R_S \quad (4.17)$$

Nach Berechnung von  $\overline{R_S}$  muss dieser Wert in die Wirkungsgradberechnung einfließen. Bild 4.2 zeigt die mittlere aktivierte Statorlänge  $\overline{l_{\text{Stator}}}$  im Konvoibetrieb sowie den mittleren Statorwiderstand  $\overline{R_S}$  in Abhängigkeit der Geschwindigkeit.



**Bild 4.2** Mittlere aktivierte Statorlänge und mittlerer Statorwiderstand bei zwei im Konvoi fahrenden Fahrzeugen

Folglich lässt sich auch das Verhältnis der mittleren Länge aktivierter Statorabschnitte zur Konvoilänge in Abhängigkeit der Anzahl  $N$  der Fahrzeuge im Konvoi darstellen (Bild 4.3).



**Bild 4.3** Verhältnis Länge aktivierter Statoren zur Länge des Konvois in Abhängigkeit der Anzahl  $N$  der Fahrzeuge (mit:  $v_M = 10$  m/s)

Die Läuferverluste müssen für die Anzahl der Konvoifahrzeuge berechnet werden. Damit ergibt sich für die Läuferverluste bei einem Konvoi bestehend aus  $N$  Fahrzeugen:

$$P_L = 3 \cdot k_L \cdot R_L \cdot (I_{Lq1}^2 + \dots + I_{LqN}^2) \quad (4.18)$$

Weiterhin gilt für einen Konvoi mit  $N$  Fahrzeugen:

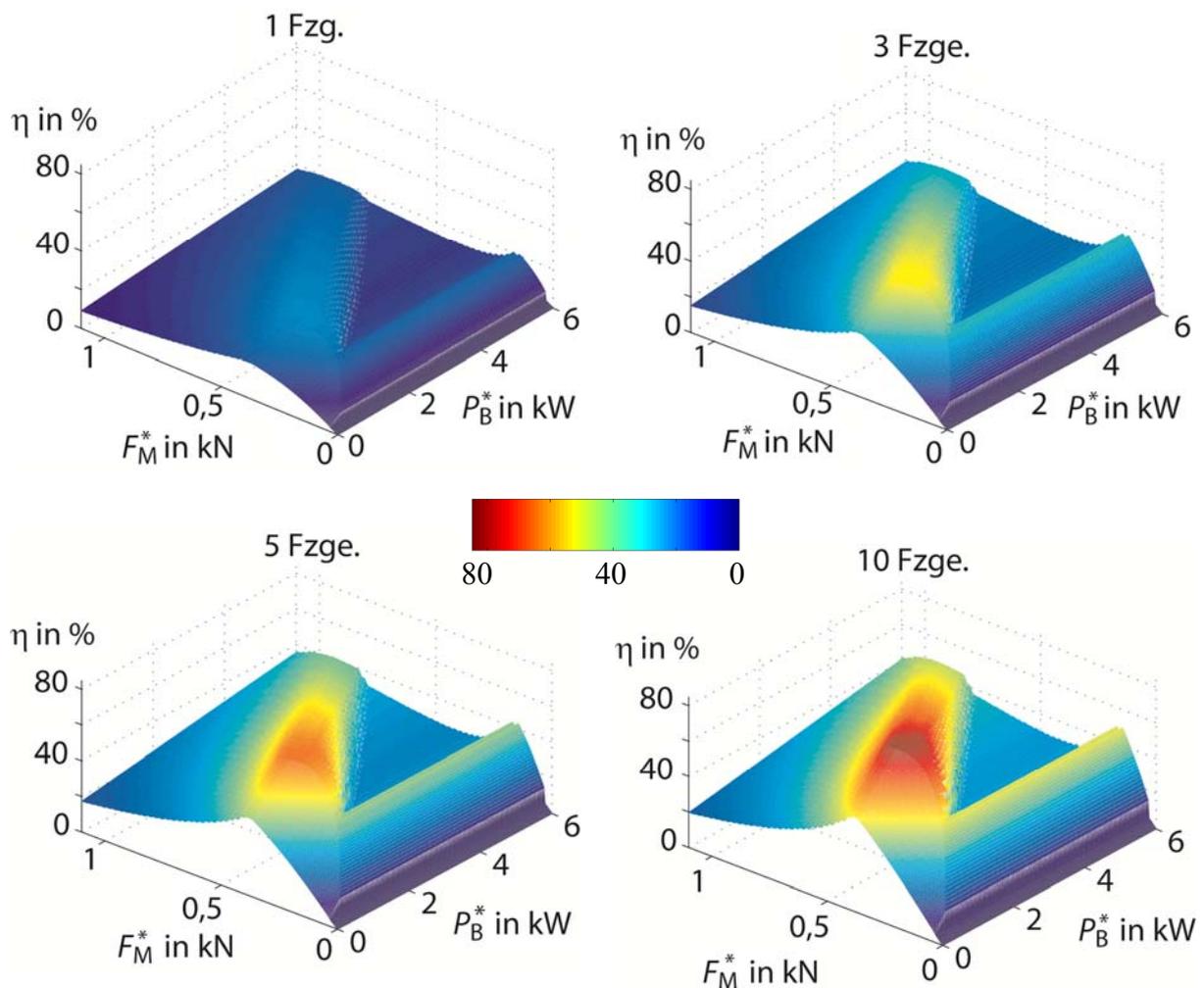
$$l_{\text{Konvoi}} = N \cdot l_{\text{Fzg}} + (N - 1) \cdot d \quad (4.19)$$

$$l_{\text{Stator, akt}} = l_{\text{Stator}} + N \cdot l_{\text{Fzg}} + (N - 1) \cdot d + 2 \cdot T_{\text{TK}} v_M \quad (4.20)$$

$$D_{\text{S, Konvoi}} = \frac{l_{\text{Stator}} + N \cdot l_{\text{Fzg}} + (N - 1) \cdot d + 2 \cdot T_{\text{TK}} v_{M, \text{max}}}{l_{\text{Stator}}} \quad (4.21)$$

$$\overline{R_{\text{S, n}}} = D_{\text{S, Konvoi}} \cdot R_S \quad (4.22)$$

In Bild 4.4 sind Wirkungsgrade für den Linearmotor dargestellt für ein Einzelfahrzeug bzw. für unterschiedliche Fahrzeuganzahlen im Konvoibetrieb mit einer Geschwindigkeit von 6 m/s.



**Bild 4.4** Wirkungsgrade des Linearmotors für verschiedene Fahrzeuganzahlen mit  $v_M = 6 \text{ m/s}$

Maßgeblich für die Verlustleistung sind vor allem die Statorwiderstände, da insbesondere bei hohen Kraftanforderungen die Amplitude des Statorstroms deutlich über der des Läuferstroms liegt. Daher erhöht sich der Wirkungsgrad des Linearmotors bei steigender Fahrzeuganzahl signifikant. Der Linearmotor wird statorseitig stets mit einer Stromamplitude von mindestens 50 A betrieben, um im Bereich geringer Schubkräfte über eine Kraftreserve zur Verfügung [Ort02]. Demzufolge resultieren in diesem Bereich verhältnismäßig hohe Statorverluste und damit geringe Wirkungsgrade.

Aufgrund des im Verhältnis zum Läufer größeren Statorwiderstandes wird der Läuferstrom bei höheren Schubkraftanforderungen im Verhältnis zum Statorstrom schneller erhöht. Insgesamt ergeben sich daher die höchsten Wirkungsgrade im Bereich mittlerer Schubkraftanforderungen, wie in Bild 4.4 zu erkennen ist.

## 4.2 Heuristik zur Vergabe der Arbeitspunkte

Aus Gl. 4.2 und Gl. 4.4 ist ersichtlich, dass die Sollwerte für Schubkraft und Leistungsübertragung jeweils von den Arbeitspunkten des Läufers und des Stators abhängen. Die Sollwerte für die Stromamplituden und Stromfrequenzen des Stators sind aufgrund der prinzipiell voneinander abweichenden Schubkraftanforderungen unterschiedlich. Im Konvoibetrieb muss ein gemeinsamer Arbeitspunkt bestimmt werden. Daher ist es auch nicht möglich, einen für jedes Fahrzeug optimalen Arbeitspunkt des Stators zu finden.

Es existieren folglich mehrere Freiheitsgrade zur Einstellung der Arbeitspunkte für Läufer und Stator, so dass die individuellen Fahrzeuganforderungen somit nicht mehr gänzlich erfüllbar sind. Dennoch ist es das Ziel, die Arbeitspunktsteuerung optimal zu betreiben. Dazu kann eine Entscheidungsheuristik eingesetzt werden, die auf der Methode der Selbstoptimierung basiert. Gemäß [FGK+04] ist der Begriff Selbstoptimierung folgendermaßen definiert:

*In einem System findet genau dann Selbstoptimierung statt, wenn durch das Zusammenwirken der enthaltenen Elemente die folgenden drei Aktionen wiederkehrend ausgeführt werden:*

1. *Analyse der Ist-Situation – Die Ist-Situation umfasst den Zustand des Systems selbst sowie alle möglichen Beobachtungen über seine Umgebung.*
2. *Bestimmung der Systemziele – Bei der Zielbestimmung können neue Ziele des Systems durch Selektion oder Anpassung von Alternativen aus einer fest vorgeschriebenen, diskreten, endlichen Menge von möglichen Zielen gewonnen werden.*
3. *Anpassung des Systemverhaltens – Das Systemverhalten ist durch die drei Aspekte Parameter, Struktur und Verhalten bestimmt.*

*Für die Selbstoptimierung ist wesentlich, dass Ziele durch das System situationsbedingt festgelegt oder angepasst werden. Ein System, in dem nur die erste und dritte, nicht aber die zweite Aktion durchgeführt werden, enthält somit keine Selbstoptimierung.*

Um die Arbeitspunktsteuerung im gesamten Konvoi optimieren zu können, werden zunächst Ziele des Energiemanagements der Einzelfahrzeuge formuliert und anschließend gewichtet bzw. priorisiert:

**Ziel 1: Ausgeglichener Energiehaushalt:** Für einen ausgeglichenen Energiehaushalt aller Konvoifahrzeuge ist es notwendig, die Speicherzustände der einzelnen Fahrzeuge zu betrachten. Anhand des Ladegrades sind Arbeitspunkte einzustellen, so dass alle Fahrzeuge stets genügend Energie an Bord mitführen.

**Ziel 2: Lange Lebensdauer der Energiespeicher:** Voraussetzung für eine lange Lebensdauer der Energiespeicher ist, dass große Belastungen der Speicher vermieden werden. Hierbei ist insbesondere eine Erwärmung der Speicher zu betrachten, die erheblich zur Reduzierung der Lebensdauer der Energiespeicher beiträgt. Eine Erwärmung der Speicher resultiert wiederum einerseits aus hohen Belastungen wie großen Lade- und Entladeströmen und andererseits aus großen Zyklensbreiten infolge von Tiefentladung und vollem Aufladen. Folglich sollte ein gewisser Lade- bzw. Entladegrad der Energiespeicher eingehalten werden.

**Ziel 3: Minimaler Energieverbrauch im Konvoi:** Dabei soll der Wirkungsgrad für die Gesamtheit  $N$  der Fahrzeuge, die einen Konvoi bilden und einen gemeinsamen Statorabschnitt befahren, maximal sein. Der Gesamtwirkungsgrad ist für das Antreiben bzw. Bremsen in Gl. 4.5 definiert.

### **Priorisierung der Ziele**

Für das Energiemanagement im Konvoi erfolgt eine Priorisierung der zuvor genannten Ziele nach definierten Kriterien. Die Schubkraftsollwerte müssen aus Gründen der Betriebssicherheit für alle Fahrzeuge erfüllt werden. Jedoch sind die Sollwerte der Leistungsübertragung nicht für alle Fahrzeuge einstellbar, wenn von den Fahrzeugen unterschiedliche Sollwerte für Kraft oder Leistungsübertragung vorgegeben werden. Aus diesem Grund wird eine Priorisierung der Ziele vorgenommen und der Sollwert der Leistungsübertragung heuristisch bestimmt.

Die Ziele Ausgeglicherener Energiehaushalt und Lange Lebensdauer der Energiespeicher sind in gewisser Weise ähnlich aber auch konkurrierend. Vorrang besitzt die Vermeidung eines zu stark entladenen Speichers, da in diesem Fall die Funktionsfähigkeit des betreffenden Fahrzeugs nicht mehr gewährleistet werden kann. Zweite Priorität besitzt die Vermeidung eines zu hohen Ladegrades und einer damit einhergehenden starken thermischen Belastung der Speicher. Um diese Priorisierung vornehmen zu können, werden als Kriterien der zukünftige fahrzeugseitige Energiebedarf entsprechend des Strecken- und Fahrprofils sowie der aktuelle Ladegrad der Energiespeicher ausgewertet.

In Tabelle 4.1 ist die resultierende Priorisierung der Arbeitspunktanforderung dargestellt. Der Arbeitspunkt des Fahrzeugs mit der höchsten Priorität wird anschließend aufgeschaltet. Bestehen keine Konflikte (ausschließlich Priorität 0), werden Ziel 1 (ausgeglicherener Energiehaushalt) und Ziel 2 (lange Lebensdauer der Energiespeicher) nicht verfolgt. Folglich ist das Ziel eine Maximierung des Gesamtwirkungsgrads des Konvois (Ziel 3).

**Tabelle 4.1 Entscheidungsheuristik zur Arbeitspunktvorgabe im Konvoi**

aktueller Ladegrad	zukünftiger Energiebedarf	Konflikte	Priorität
hoch	hoch	keine	0
	mittel	Überladung Speicher	2
	niedrig	Überladung Speicher	3
mittel	hoch	zu wenig Energie	1
	mittel	keine	0
	niedrig	keine	0
niedrig	hoch	zu wenig Energie	5
	mittel	zu wenig Energie	4
	niedrig	keine	0

Der Linearmotor soll gemäß den zwei zuvor genannten Anforderungen und Zielen wirkungsgradoptimal betrieben werden. Das bedeutet, dass im ersten Arbeitsschritt die zu berücksichtigende Schubkraft aus den Sollwerten der einzelnen Fahrzeuge  $F_{Mn}^*$  ermittelt werden muss:

$$|F_{M,\max}^*| = \text{Max} \left\{ |F_{Mn}^*| \right\} \quad (4.23)$$

Da der Statorstrom stets mit einem positiven Vorzeichen vorgegeben wird, wird das Vorzeichen der resultierenden Schubkraft vom jeweiligen Fahrzeug über das Vorzeichen des Läuferstroms eingestellt (vgl. Gl. 4.2). Im nächsten Schritt wird anhand der Entscheidungsheuristik festgelegt, welcher Sollwert der Leistungsübertragung für die Berechnung des streckenseitigen Arbeitspunktes zugrunde gelegt wird. Dies ist folglich als Funktion der Prioritäten sowie der angeforderten Leistungen zu sehen:

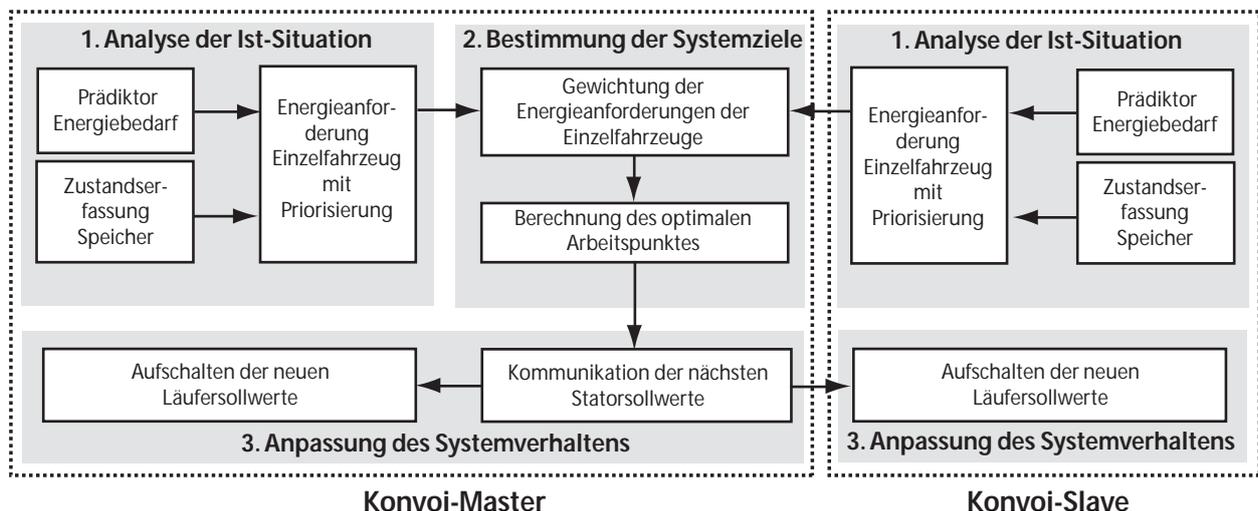
$$P_B^* = f(p_{r_1} \dots p_{r_N}, P_{B1}^* \dots P_{BN}^*) \quad (4.24)$$

Somit werden die Schubkraftanforderungen der Fahrzeuge eingehalten und zudem die Leistungsanforderungen berücksichtigt. Die Frequenz des Statorstroms wird schließlich von dem Master-Fahrzeug (vgl. Kap. 3.2.2) vorgegeben.

## Optimierungsprozess zur Steuerung der Energieflüsse im Konvoiberieb

In Kap. 3 wurde bereits die Realisierung der Funkkommunikation vorgestellt, die für die Aushandlung der Streckensollwerte und für die Übertragung dieser Werte zur Strecke benötigt wird. Dabei wurde auch eine Verteilung der Rollen Konvoi-Master sowie Konvoi-Slave vorgenommen. Die Optimierung der Arbeitspunktsteuerung wird ebenfalls entsprechend dieser Rollen vorgenommen.

Wie in Bild 4.5 dargestellt, findet eine zentrale Optimierung des Energiemanagements im Konvoi statt. Fahrzeuge, die sich im Zustand Konvoi-Slave befinden, müssen zwar die erste und die dritte Aktion der Selbstoptimierung nach [FGK+04] ausführen, aber die zweite Aktion wird ebenso wie das Kommunizieren der neuen Statorsollwerte ausschließlich vom Konvoi-Master durchgeführt.



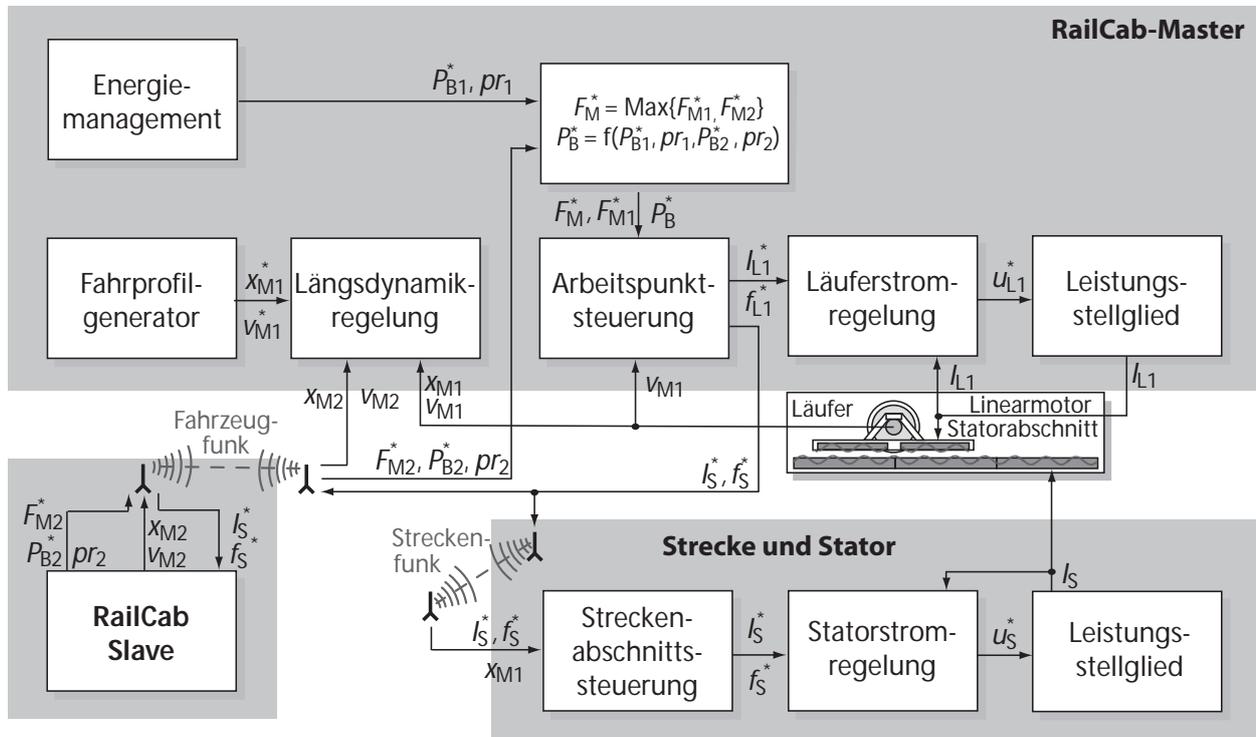
**Bild 4.5** Optimierungsprozess zur Steuerung der Energieflüsse im Konvoiberieb

## Struktureller Aufbau der Arbeitspunktsteuerung im Konvoiberieb

Bild 4.6 illustriert die resultierende Struktur der Antriebsregelung im Konvoiberieb für das Master-Fahrzeug illustriert. Ebenso sind die Funkverbindungen zur Strecke sowie zum Slave-Fahrzeug dargestellt.

Wie bereits in Kap. 3.2.2 beschrieben, findet eine Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation statt, die unter anderem zum Aushandeln des statorseitigen Arbeitspunktes während des Konvoiberiebs benötigt wird. Dabei werden die Sollwerte für die Schubkraft und die Leistungsübertragung vom Slave an den Master geschickt. Nach einer Auswertung der Sollwerte berechnet die Arbeitspunktsteuerung des Masters die Statorsollwerte für Stromamplitude und Stromfrequenz und schickt diese gleichzeitig an die Strecke und den Slave. Der Master ist allein zuständig für die Übersendung der Sollwerte zur Stre-

ckensteuerung. Folglich ist die Arbeitspunktsteuerung nur im Master im vollen Umfang aktiv und errechnet sowohl Stator- als Läuferollwerte. Die Arbeitspunktsteuerung des Slave berechnet lediglich aus den per Funk erhaltenen Statorsollwerten die fahrzeugseitigen Läuferollwerte, um die erforderliche Schubkraft einstellen zu können.



**Bild 4.6** Struktur der Antriebsregelung im Konvoibetrieb

### 4.3 Leistungsübertragung im Konvoibetrieb

In diesem Abschnitt wird die Leistungsübertragung im Konvoibetrieb untersucht. Dazu werden die unterschiedlichen in Betracht kommenden Betriebsstrategien für Konvoifahrten analysiert.

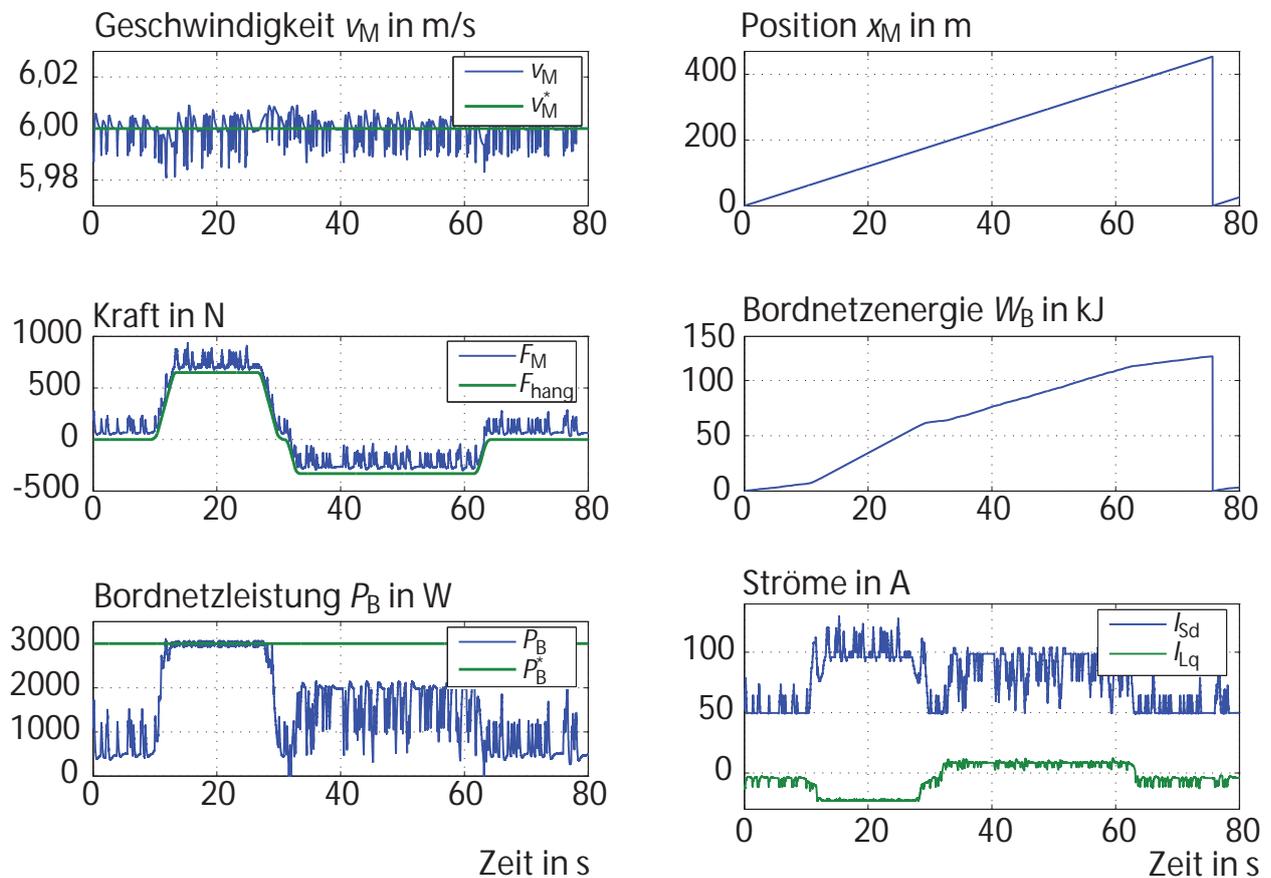
Das Betriebskonzept der RailCabs sieht einen ungekoppelten, abstandsgeregelten Betrieb vor. Jedoch ist es beispielsweise auch ohne mechanische Kopplungsvorrichtung möglich, einen Schiebetrieb mit einwirkender Druckkraft zwischen den Fahrzeugen zu realisieren. Der mechanisch gekoppelte Betrieb stellt eine weitere Betriebsart dar, bei der folglich auch Zugkräfte eingepreist werden können.

Nachfolgend wird zunächst eine Analyse der Leistungs- und Energieflüsse vorgenommen, um die Abhängigkeiten der Leistungsübertragung hinsichtlich des Strecken- und Fahrprofils und auch der Kommunikationseinrichtungen zwischen den Fahrzeugen zur

Aushandlung eines gemeinsamen Arbeitspunkts im Konvoibetrieb darzustellen. Anschließend werden die Betriebsarten abstandsgeregelte Fahrt, Schiebetrieb und gekoppelter Betrieb miteinander verglichen.

### 4.3.1 Analyse der Leistungs- und Energieflüsse bei Einzelfahrten

Bild 4.7 zeigt die Leistungsflüsse sowie die über den DGALM in das Bordnetz eingespeiste Energie (Bordnetzenergie) eines RailCabs (Einzelfahrt) während einer Umfahrt auf dem Oval der NBP-Versuchsanlage. Ein Vergleich der Verläufe von Kraft und Leistungübertragung zeigt deutlich die direkte Abhängigkeit dieser beiden Größen. Auf ebenen Streckenabschnitten wird daher wenig Energie übertragen. Strecken mit Steigungen bzw. Gefälle erfordern höhere Schubkräfte. Einhergehend damit wird mehr Energie in das Bordnetz des Fahrzeugs eingespeist. Im vorliegenden Betriebsfall kann die geforderte Leistung von 3 kW nur auf dem Steigungsabschnitt übertragen werden. Auf den übrigen Streckenabschnitten werden während der Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit nur geringe Kräfte eingestellt. Der Sollwert der Leistungsübertragung kann nicht erreicht werden.



**Bild 4.7** Leistungsverläufe und eingespeiste Bordnetzenergie eines Einzelfahrzeugs

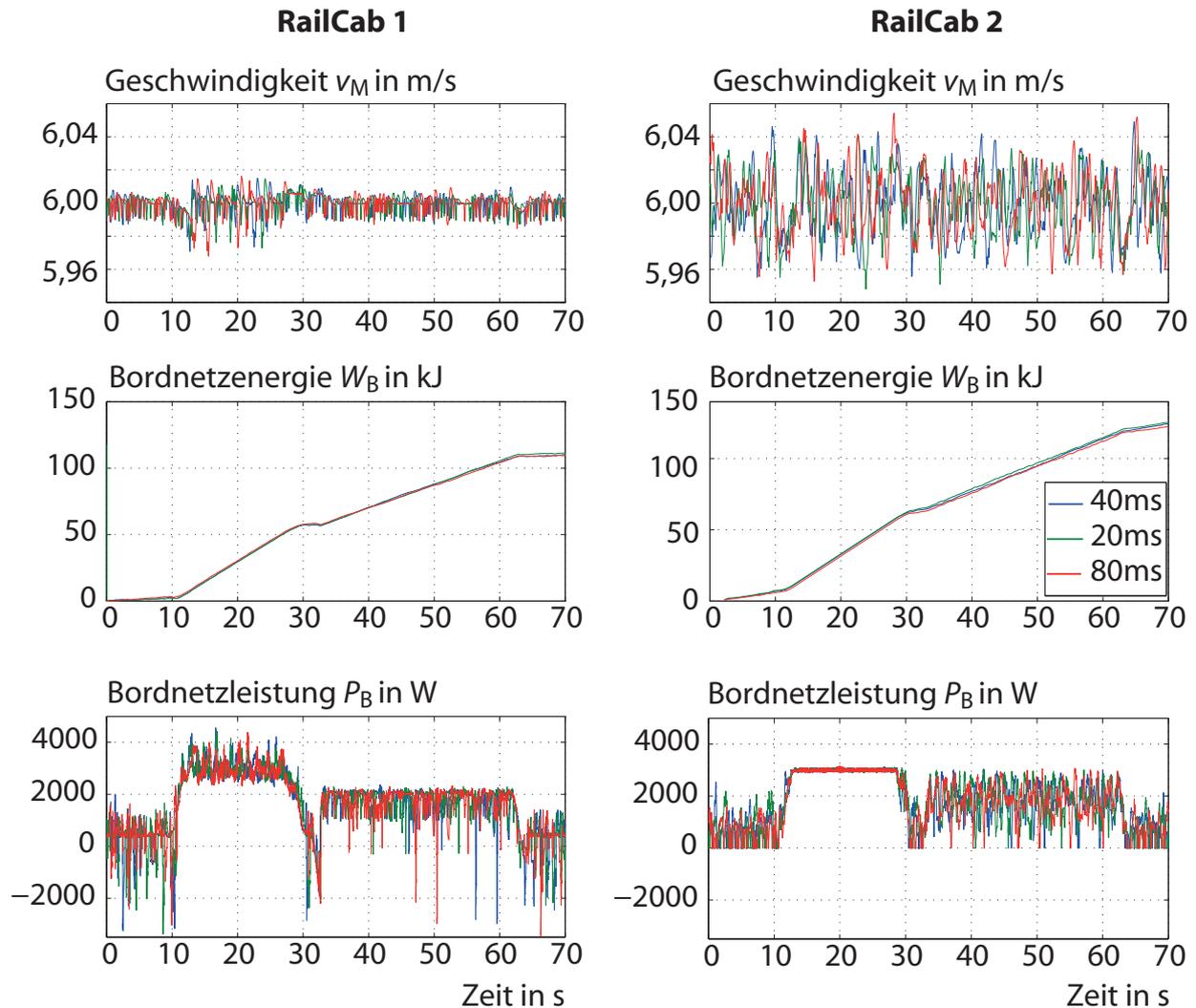
Folglich steht die Leistungsübertragung in direktem Zusammenhang mit dem Fahrwiderstand der Fahrzeuge. Maßgeblich ist dabei der Steigungswiderstand. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten nimmt der Anteil des Luftwiderstands am Fahrwiderstand deutlich zu. Die Luftwiderstandskraft stellt dann einen sehr wichtigen Einflussfaktor dar. Dies ist dann wiederum bei Konvoifahrten relevant, weil das Führungsfahrzeug gegenüber den Folgefahrzeugen einen größeren Luftwiderstand überwinden muss. Es sind dann unterschiedliche Fahrwiderstände wirksam, was zwingend zu Differenzen bezüglich der Leistungsübertragung in die Bordnetze der jeweiligen Fahrzeuge führt.

### **4.3.2 Einflussanalyse der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation auf die Leistungsübertragung**

Im Konvoibetrieb müssen die Arbeitspunkte zwischen den Fahrzeugen ausgehandelt werden. Die hierzu benötigte Kommunikationssequenz erfordert eine Dauer von 20 ms (vgl. Kap. 3.2.2). Die Zeitdauer von der Anforderung neuer Statorsollwerte bis zur Aufschaltung dieser Sollwerte erhöht sich aufgrund dieser zusätzlichen Kommunikationssequenz von 41,8 ms im Einzelbetrieb auf 61,8 ms im Konvoibetrieb. Da durch die weitere Funkstrecke zudem noch zusätzliche Übertragungsfehler entstehen können, ist eine Einflussanalyse der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation auf die Leistungsübertragung erforderlich, bei der mögliche Einflussfaktoren untersucht werden.

Eine Analyse der Einflüsse durch die Kommunikationssequenz für das Aushandeln der Statorsollwerte kann anhand unterschiedlicher Vorgaben für die Zeitdauern (20 ms, 40 ms, 80 ms) vorgenommen werden. In Bild 4.8 sind die entsprechenden Ergebnisse in der Energie- bzw. Leistungsübertragung dargestellt. Die Sollwertvorgabe erfolgt durch das Folgefahrzeug (RailCab 2).

Die Resultate zeigen keine signifikanten Einflüsse auf die Leistungsübertragung. Insgesamt sind die Einflüsse der Funkstrecke zwischen den Fahrzeugen auf die Leistungsübertragung relativ gering, selbst wenn viele Übertragungsfehler auftreten. Genauere Untersuchungen sind in [Buc09] ausführlich dargestellt ist. Zudem zeigt ein Vergleich der Bilder 4.7 und 4.8, dass auch die Fahrdynamik durch die erhöhte Zeitdauer bis zum Aufschalten der Statorsollwerte nicht negativ beeinflusst wird.



**Bild 4.8** Einfluss unterschiedlicher Übertragungszeiten der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation auf die Leistungsübertragung

### 4.3.3 Analyse der Betriebsarten

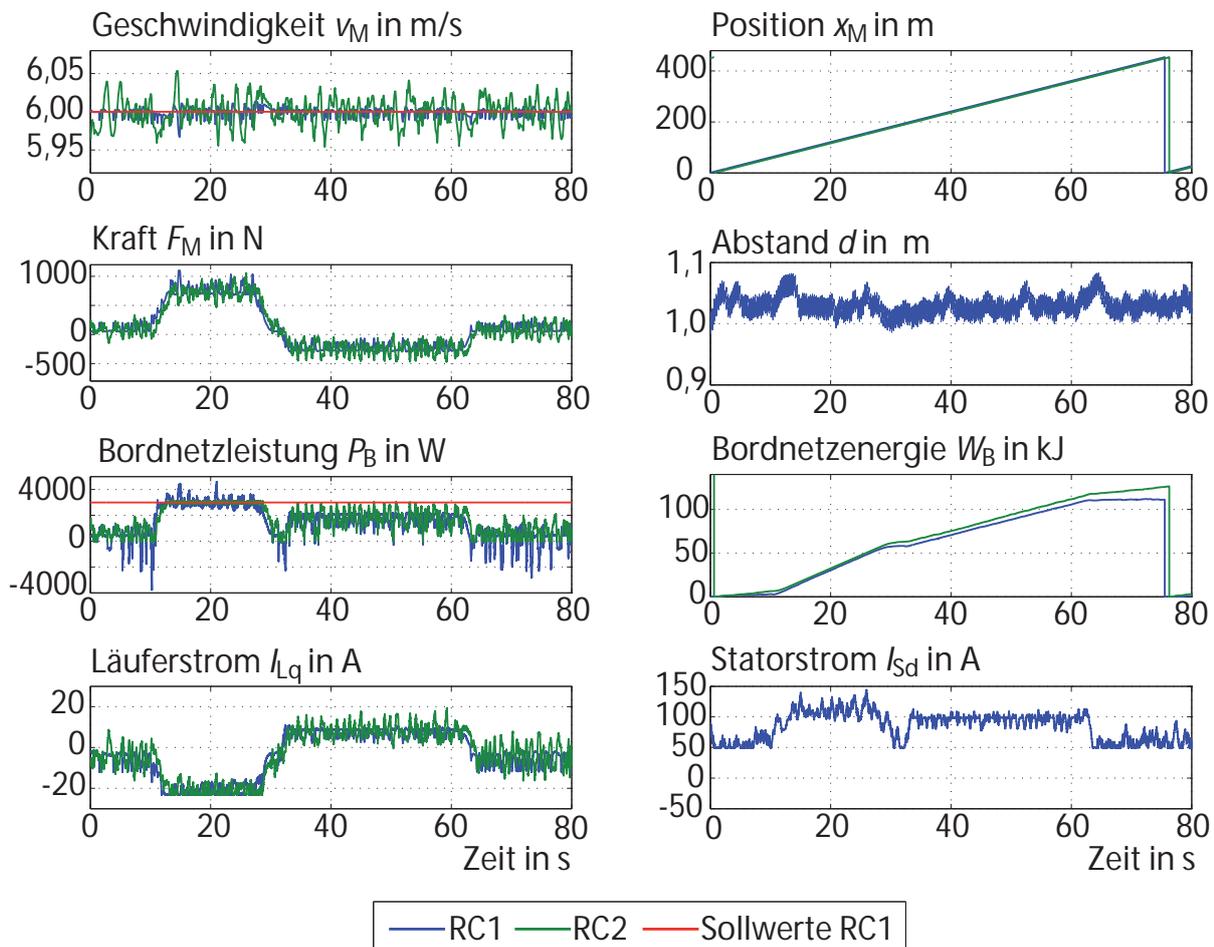
Nachfolgend werden die drei Betriebsarten abstandsgeregelter Betrieb, Schiebetrieb und gekoppelter Betrieb dargestellt und miteinander verglichen.

#### Abstandsgeregelter Betrieb

Im vorliegenden Fall des abstandsgeregelten Betriebs wird RailCab 1 als Führungsfahrzeug mit einer Sollgeschwindigkeit von 6 m/s und einem Sollwert von 3 kW für die Leistungsübertragung ins Bordnetz betrieben. RailCab 2 soll im Abstand von 1 m folgen. Diese Vorgaben stellen einen üblichen Betriebspunkt auf der RailCab-Versuchsanlage dar. Die Ergebnisse sind in Bild 4.9 zu sehen.

Ein Vergleich zwischen dem Führungsfahrzeug und dem Folgefahrzeug zeigt, dass zum Folgefahrzeug etwas mehr Leistung übertragen wird als zum Führungsfahrzeug. Dies wird in Bild 4.9 anhand der in das Bordnetz eingespeisten Energie  $W_B$  deutlich.

Im Bereich des Steigungsabschnitts (zwischen ca. 12 s und 24 s) treten kaum Abweichungen in der Leistungsübertragung auf. Während der anschließenden Überfahrt des ebenen Streckenabschnitts und der Gefällestrecke wird jedoch ein Unterschied deutlich. Nach einer Umfahrt liegt die Differenz der übertragenen Bordnetzenergie zwischen den beiden Fahrzeugen bei ca. 13%.



**Bild 4.9** Abstandsgeregelte Folgefahrt im Konvoi (RC1 ist Führungsfahrzeug)

Ein Grund hierfür liegt einerseits daran, dass die Schubkraft des Folgefahrzeugs aufgrund der Ausregelvorgänge des Sollabstands generell etwas höher liegt. Andererseits sind die Schubkraftanforderungen auf dem ebenen Streckenabschnitt und der Gefällestrecke relativ gering. Daher kommt es trotz der Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit (RailCab 1) bzw. konstantem Abstand (RailCab 2) teilweise zu einem Wechsel zwischen treibender und bremsender Kraft. Im Konvoibetrieb muss jedoch die Statorstromfrequenz  $f_s$  für bei-

de Fahrzeuge gleich sein und somit werden beide Fahrzeuge je nach Krafrichtung entweder unter- oder übersynchron betrieben. Da das Fahrzeug, das als Konvoi-Master in der Kommunikation agiert, das Vorzeichen bestimmt, kann es auf dem jeweils anderen Fahrzeug zu einer Umkehrung des Energieflusses kommen. Deshalb wird insgesamt etwas mehr Energie in das Bordnetz des Folgefahrzeugs übertragen als bei einer Einzelfahrt. Im Falle des Führungsfahrzeugs fällt die übertragene Gesamtenergie etwas geringer aus.

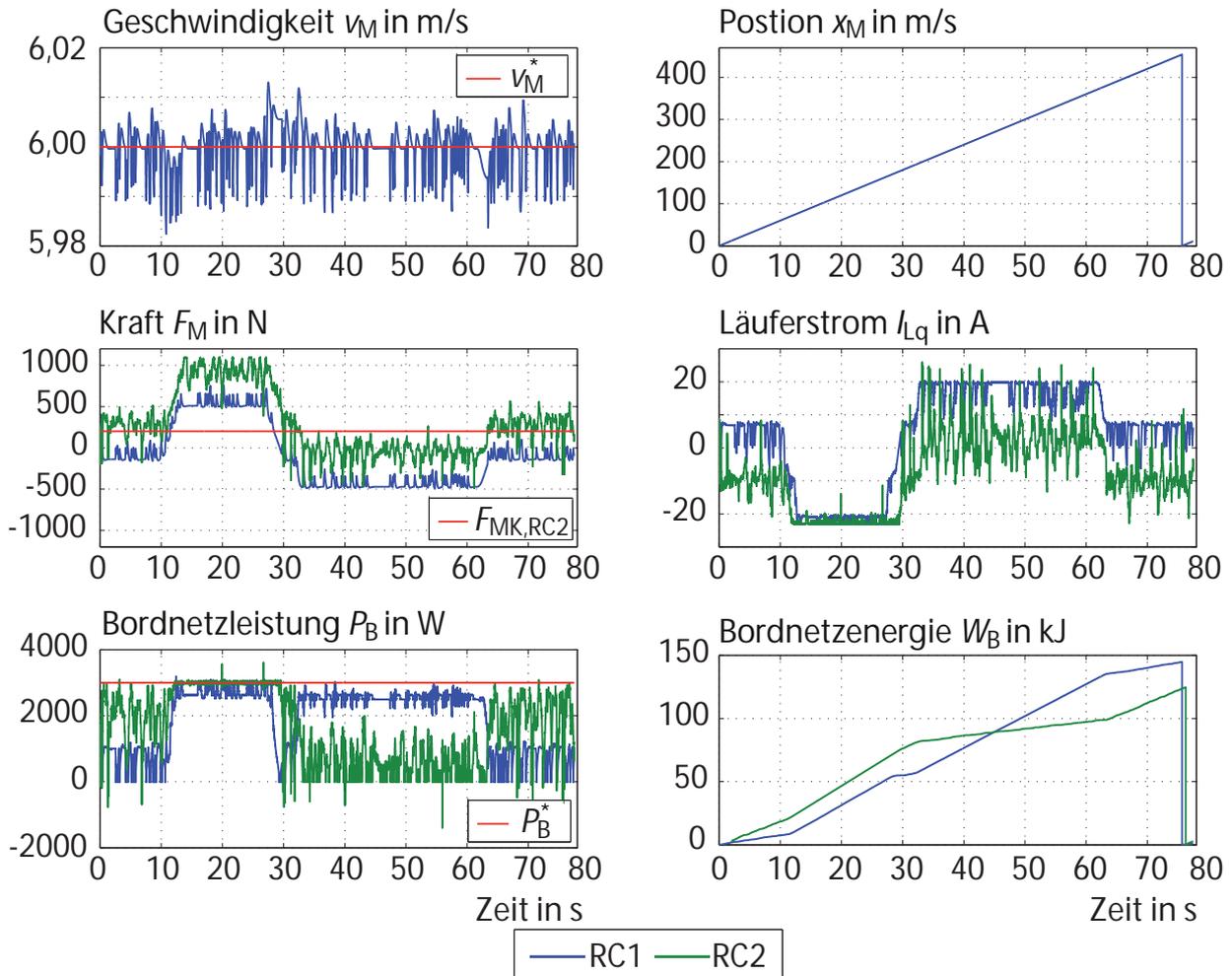
Aus den Simulationsergebnissen zeigt sich daher eine Eigenschaft der Arbeitspunktsteuerung im Konvoi, die sich bei geringen Kraftanforderungen der Fahrzeuge negativ auf die Leistungseinspeisung in die Fahrzeuge auswirkt. Die Arbeitspunktsteuerung eines Einzelfahrzeugs reagiert auf die Umkehrung der Krafrichtung entsprechend mit einem Vorzeichenwechsel der Statorfrequenz. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass sich stets Energie in das Fahrzeug einspeisen lässt. Weisen die Schubkräfte der Fahrzeuge im Konvoi unter bestimmten Umständen jedoch ein unterschiedliches Vorzeichen auf, kann ein für beide Fahrzeuge optimaler Arbeitspunkt des DGALM nicht gefunden werden.

### **Schiebebetrieb**

Eine weitere Betriebsart stellt der Schiebebetrieb dar, bei dem die Fahrzeuge nicht fest miteinander verkoppelt sind und das Folgefahrzeug auf das Führungsfahrzeug folglich ausschließlich Druckkräfte ausüben kann. Die Ergebnisse für diese Betriebsart sind in Bild 4.10. dargestellt.

Das Folgefahrzeug schiebt das Führungsfahrzeug kontinuierlich mit der Kraft  $F_{MK,RC2} = 200 \text{ N}$  an. Während der Überfahrt des Steigungsbereichs unterstützt das Folgefahrzeug das Führungsfahrzeug. Die Schubkraft des Führungsfahrzeugs sinkt und einhergehend damit auch die Leistungsübertragung. Das Folgefahrzeug erfährt hingegen eine erhöhte Leistungsübertragung.

Während der Gefällefahrt wirkt das Führungsfahrzeug der schiebenden Kraft des Folgefahrzeugs entgegen und hat damit eine höhere Schubkraft. Die resultierende Schubkraft des Folgefahrzeugs ist wiederum sehr gering, so dass fast keine Leistungsübertragung in das Bordnetz des Folgefahrzeugs erfolgt. Auf das Führungsfahrzeug wirkt sich dies jedoch sehr positiv aus. Durch den erhöhten Bedarf an bremsender Kraft kann viel Energie übertragen werden. Folglich kann mit dieser Betriebsart großer Einfluss auf die Leistungsübertragung genommen werden. Insbesondere auf dem Gefälleabschnitt kann die Leistungsübertragung in das Bordnetz des Führungsfahrzeugs stark beeinflusst werden.

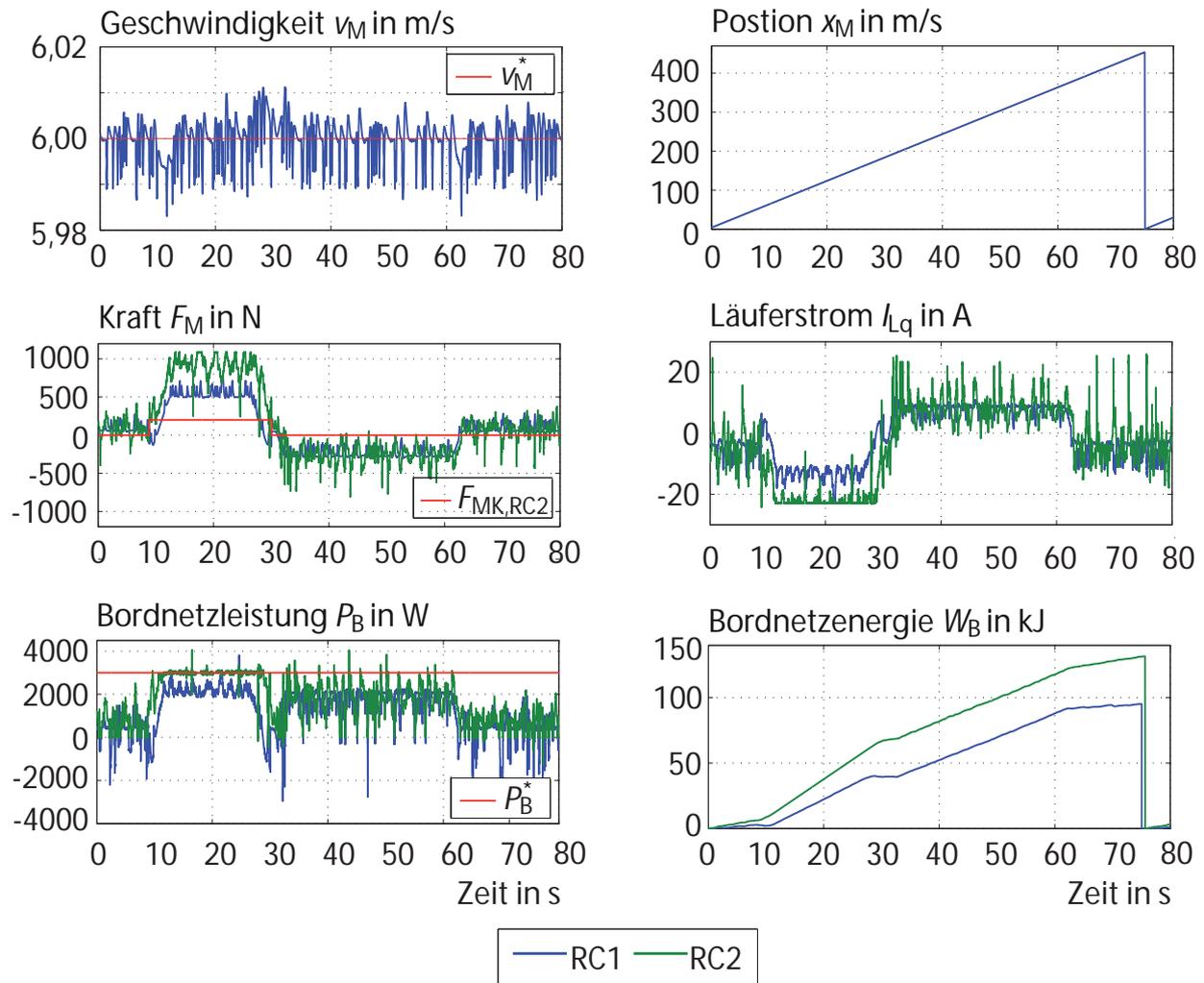


**Bild 4.10 Konvoifahrt im Schiebetrieb (RC2 schiebt mit 200 N)**

## Gekoppelter Betrieb

Der gekoppelte Betrieb stellt die dritte Betriebsart dar. Dabei können sowohl Druck- als auch Zugkräfte zwischen den Fahrzeugen wirken. Bild 4.11 zeigt Ergebnisse für eine Fahrt, bei der das Folgefahrzeug (RailCab 2) während der Steigungsfahrt das Führungsfahrzeug mit  $F_{MK,RC2} = 200 \text{ N}$  schiebt und während der Gefällefahrt das Führungsfahrzeug mit 200 N abbremst. Auf den ebenen Streckenabschnitten wirken weder Druck- noch Zugkräfte.

Im vorliegenden Fall wird mehr Energie in das Bordnetz des Folgefahrzeugs übertragen, da die Schubkraft sowohl auf dem Steigungs- als auch auf dem Gefälleabschnitt ansteigt. Die Leistungsübertragung ins Bordnetz des Führungsfahrzeugs fällt aufgrund der dort geringeren Schubkraft deutlich geringer aus.



**Bild 4.11 Konvoifahrt im gekoppelten Betrieb**

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Es existieren unterschiedliche Betriebsarten für die Konvoifahrt der RailCabs. Je nach gewünschter Leistungsübertragung ins Bordnetz und in Abhängigkeit des Streckenprofils kann situationsbedingt eine Wahl der Betriebsart vorgenommen werden. Die Leistungsflüsse lassen sich damit in gewissen Grenzen steuern.

Im abstandsgeregelten Betrieb weist die Leistungsübertragung auf alle Fahrzeuge eine ähnliche Größe auf, und hängt wesentlich vom Fahrwiderstand der Fahrzeuge ab. Erst im Bereich höherer Fahrgeschwindigkeiten, wenn auf die einzelnen Fahrzeuge unterschiedliche Luftwiderstandskräfte wirken, treten größere Differenzen in der Leistungsübertragung zwischen den Fahrzeugen auf.

Durch die Betriebsarten Schiebetrieb und gekoppelter Betrieb kann gezielt eine höhere oder niedrigere Leistungsübertragung eingestellt werden. In Tabelle 4.2 ist eine Übersicht und eine Bewertung der Betriebsarten hinsichtlich der Leistungsübertragung dargestellt.

**Tabelle 4.2 Übersicht und Bewertung der Betriebsarten hinsichtlich der Leistungsübertragung für den Konvoibetrieb**

Betriebsart	Streckenabschnitt	Führungsfahrzeug	Folgefahrzeug
Abstandsgeregelt	Ebene	-	-
	Steigung	++	++
	Gefälle	+	+
Schiebetrieb (Druckkraft durch Folgefahrzeug)	Ebene	--	+
	Steigung	+	++
	Gefälle	++	--
Gekoppelter Betrieb (Zugkraft durch Folgefahrzeug)	Ebene	+	--
	Steigung	++	+
	Gefälle	--	++

Legende: ++ sehr gute Leistungsübertragung + gute Leistungsübertragung  
- geringe Leistungsübertragung -- sehr geringe Leistungsübertragung

Durch die Wahl der Betriebsart ergeben sich weitere Freiheitsgrade, die zur Einstellung der Leistungsflüsse im Konvoibetrieb genutzt werden können. Aus dieser Bewertung und der übergeordneten Ziele des Energiemanagements (vgl. Tab. 4.1) können konkrete Anwendungsszenarien für den Konvoibetrieb extrahiert werden. Nachfolgend sind zwei Beispiele exemplarisch beschrieben:

- Wenn z.B. der Ladegrad des Bordnetzes des Führungsfahrzeugs hoch ist und der zukünftige Energiebedarf eher niedrig, das Folgefahrzeug aber zugleich genügend Reserve besitzt um Energie aufzunehmen, sollte beim Fahren auf einem ebenen Streckenabschnitt oder auf einer Steigung der Schiebetrieb eingestellt werden. Dadurch lässt sich einer Überladung der Energiespeicher des Führungsfahrzeugs entgegenwirken.
- Sollte eine Überfahrt eines längeren Gefälleabschnitts bevorstehen und der Ladegrad des Speichers des Folgefahrzeugs niedrig sein im Gegensatz zum Ladegrad

des Führungsfahrzeugs, so sollten die Fahrzeuge gekoppelt betrieben werden und das Folgefahzeug eine Zugkraft auf das Führungsfahrzeug ausüben. Die vom Folgefahzeug aufzubringende bremsende Kraft wird auf diese Weise erhöht und es resultiert eine sehr gute Leistungsübertragung zum Folgefahzeug.

Generell hängen diese Anwendungsszenarien von der jeweiligen Streckentopologie sowie vom Fahrprofil ab. Einflussfaktoren wie die Masse der Fahrzeuge und vor allem die Fahrgeschwindigkeit und die damit verbundenen fahrzeugspezifischen Fahrwiderstände sind dabei von entscheidender Bedeutung.

## **5. Regelung der Fahrzeuglängsdynamik**

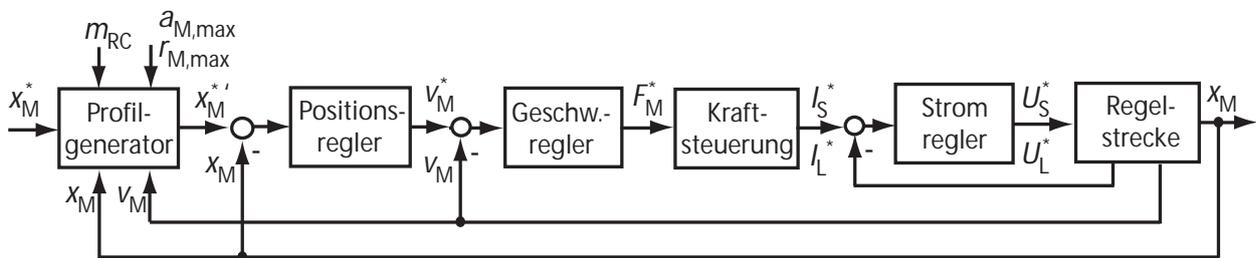
Bei klassischen spurgeführten Fahrzeugen erfolgt lediglich eine Regelung der Längsbewegung. Zwar wird bei den hier vorgestellten Schienenfahrzeugen auch eine Regelung in Querrichtung vorgenommen, jedoch bezieht sich diese darauf, ein Anlaufen des Spurkranzes an den Schienen zu vermeiden. Da die maximal mögliche Verschiebung in Querrichtung relativ gering ist, wird bezüglich der hier vorgestellten Fahrdynamikregelung lediglich die Längsregelung betrachtet. Die Regelung in Querrichtung wird als entkoppelt gegenüber der Regelung in Längsrichtung betrachtet.

In diesem Kapitel wird zunächst die Struktur der Längsdynamikregelung für ein Einzelfahrzeug beschrieben. Dies beinhaltet die Geschwindigkeits- und Positionsregelung sowie Maßnahmen zur Fahrprofilgenerierung. Als Erweiterung der Positionsregelung eines Einzelfahrzeugs wird die Abstandsregelung für den Konvoibetrieb vorgestellt. Hierzu werden Strategien für unterschiedliche Betriebsfälle aufgestellt, die eine Konvoifahrt überhaupt erst ermöglichen.

### **5.1 Struktur der Längsdynamikregelung**

Hinsichtlich der Fahrzeuglängsregelung ist neben dem Erreichen einer gewünschten Fahrdynamik insbesondere die Regelung des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug von Bedeutung. Eine Aufgabe der Fahrzeuglängsregelung besteht darin, das Fahrzeug auf einer gewünschten Geschwindigkeit zu stabilisieren oder eine Zielposition anzufahren und dabei stationäre Genauigkeit zu erreichen. Gutes Störverhalten ist von besonderer Bedeutung, da das Fahrzeug trotz veränderlicher Fahrwiderstände (Fahrt auf Steigungs- oder Gefällestrecken, Gegenwind etc.) seine Geschwindigkeit möglichst konstant halten soll. Hinsichtlich des Führungsverhaltens ist vor allem auf überschwingungsfreies Verhalten zu achten. Da die geforderten Konvoimanöver schnelles Agieren der Fahrzeuge erfordern, ist die Schnelligkeit des Regelkreises maßgeblich. Dem sicheren Betrieb ist jedoch zwingend die höchste Priorität zuzuordnen. Zudem spielen auch Komfortgrößen (z.B. Beschleunigung, Ruck) für ein Transportfahrzeug eine wichtige Rolle.

Diese vielen Anforderungen an die Längsdynamikregelung im Hinblick auf autonome Konvoifahrten können mit einem einfachen Regler nicht erfüllt werden. Daher ist die Längsdynamikregelung strukturell aufgeteilt in einen Profilverzeuger zur Sollwerterzeugung sowie einen Positions- und Geschwindigkeitsregler. Während der Geschwindigkeitsregler kontinuierlich eingesetzt wird, wird der Positionsregler nur für Zieleinfahrten aktiviert. Im Falle einer Konvoifahrt dient der Positionsregler zudem als Abstandsregler (vgl. Kap. 5.2). Die Fahrzeugbeschleunigung wird nicht gemessen, so dass sich eine Steuerung der Motorkraft anschließt. Diesem Element wiederum unterlagert befinden sich die Stromregelkreise von Stator und Läufer, die bereits in den Servoreglern des Antriebs implementiert sind (vgl. Bild 5.1).



**Bild 5.1** Regelkreisstruktur der Längsdynamik

Die Regelung der Fahrzeuglängsbewegung erfolgt demnach nach dem Prinzip einer mehrstufigen Kaskadenregelung [Leo00]. Der unterlagerten Geschwindigkeitsregelung ist eine Positionsregelung überlagert. Vorteile der kaskadierten Regelung liegen in der einfachen Reglerauslegung, die von innen nach außen erfolgt. Dementsprechend wird zunächst der Geschwindigkeitsregelkreis ausgelegt. Anschließend wird das Verhalten des unterlagerten Regelkreises durch ein Übertragungsglied approximiert, um den Positionsregelkreis auslegen zu können. Zudem werden Störungen, die in den unterlagerten Regelkreisen auftreten, dort auch schneller ausgeglichen.

### 5.1.1 Geschwindigkeitsregelung

Voraussetzung für den Reglerentwurf ist das Erstellen eines mathematischen Modells der Regelstrecke, so wie es in Kap. 2.4 bereits beschrieben wurde.

Da die Regelstrecke der Geschwindigkeitsregelung ein  $IT_1$ -Verhalten aufweist, wird ein PI-Regler eingesetzt. Folglich ergeben sich unter Einbeziehung von Gl. 2.16 die Übertragungsfunktionen  $G_{ov}(s)$  für den offenen und  $G_{gv}(s)$  für den geschlossenen Geschwindigkeitsregelkreis:

$$G_{\text{ov}}(s) = G_{\text{Rv}}(s) \cdot G_{\text{Sv}}(s) = \frac{K_{\text{Rv}} \cdot (1 + T_{\text{Nv}} \cdot s)}{T_{\text{Nv}} \cdot s} \cdot \frac{K_{\text{v}}}{(1 + T_{\text{sum,v}} \cdot s) \cdot s} = \frac{K_{\text{Rv}} \cdot 1/m_{\text{RC}} \cdot (1 + T_{\text{Nv}} \cdot s)}{T_{\text{Nv}} \cdot T_{\text{sum,RC}} \cdot s^3 + T_{\text{Nv}} \cdot s^2} \quad (5.1)$$

$$G_{\text{gv}}(s) = \frac{K_{\text{Rv}} \cdot 1/m_{\text{RC}} \cdot (1 + T_{\text{Nv}} \cdot s)}{T_{\text{Nv}} \cdot T_{\text{sum,SR}} \cdot s^3 + T_{\text{Nv}} \cdot s^2 + T_{\text{Nv}} \cdot K_{\text{Rv}} \cdot 1/m_{\text{RC}} \cdot s + K_{\text{Rv}} \cdot 1/m_{\text{RC}}} \quad (5.2)$$

Der Vorhalt in Gl. 5.1 bewirkt ein stärkeres Überschwingen. Um dies zu vermeiden, wird ein Vorfilter mit der Übertragungsfunktion  $G_{\text{F}}(s) = (1 + T_{\text{Nv}} \cdot s)^{-1}$  zur Kompensation eingesetzt. Gemäß den Einstellregeln des *Symmetrischen Optimums* [LW05], ergeben sich die nachfolgenden Reglerparameter unter Berücksichtigung des Dämpfungsparameters  $a$ :

$$K_{\text{Rv}} = \frac{m_{\text{RC}}}{a \cdot T_{\text{sum,SR}}} \quad T_{\text{Nv}} = a^2 \cdot T_{\text{sum,SR}} \quad (5.3)$$

Schließlich resultiert für den geschlossenen Regelkreis mit Vorfilter:

$$G_{\text{gv}}(s) = \frac{1}{a^3 \cdot T_{\text{sum,RC}}^3 \cdot s^3 + a^3 \cdot T_{\text{sum,RC}}^2 \cdot s^2 + a^2 \cdot T_{\text{sum,RC}} \cdot s + 1} \quad (5.4)$$

Die Schubkraft des Antriebs ist sowohl durch die Motoren als auch durch die Leistungsglieder begrenzt. Wenn die Schubkraft und damit auch die Motorströme gesättigt sind, führt diese Nichtlinearität in Verbindung mit dem Integralanteil des Geschwindigkeitsreglers zu einem sogenannten *Integrator-Windup* [Lit01]. Um diesem Verhalten entgegenzuwirken, verfügt der Geschwindigkeitsregelkreis über einen dynamischen *Anti-Windup-Reset*, der dafür sorgt, dass der Integrator bei Erreichen der Sättigungsgrenze der Stellgröße immer so zurückgesetzt wird, dass die Summe aus P- und I-Anteil des Reglers mit den Sättigungsgrenzen korrespondiert. Durch diese Maßnahme wird schließlich die Stellgrößenbeschränkung des Antriebs berücksichtigt.

### 5.1.2 Positionsregelung

Um die überlagerte Positionsregelung auslegen zu können, muss das Übertragungsverhalten der unterlagerten Geschwindigkeitsregelung identifiziert werden. Aus der Sprungantwort des Geschwindigkeitsregelkreises ergibt sich näherungsweise folgende Übertragungsfunktion  $G_{\text{Sx}}(s)$  für die Regelstrecke der Positionsregelung:

$$G_{\text{Sx}}(s) = \frac{1}{(1 + T_1 \cdot s) \cdot (1 + T_2 \cdot s) \cdot s} = \frac{1}{1 + 3,253\text{s} \cdot s + 3,66\text{s} \cdot s^2} \cdot \frac{1}{s} \quad (5.5)$$

Da in der Regelstrecke bereits ein I-Anteil enthalten ist, wird kein zusätzlicher I-Anteil im Regler benötigt, um stationäre Genauigkeit gewährleisten zu können. Der Geschwin-

digkeitsregelkreis wird schließlich durch ein  $PT_1$ -Glied mit der Zeitkonstante  $T_{sum,x} = T_1 + T_2$  approximiert. Durch den Einsatz eines P-Reglers resultieren dann die Übertragungsfunktionen  $G_{ox}(s)$  für den offenen bzw.  $G_{gx}(s)$  für den geschlossenen Regelkreis:

$$G_{ox}(s) = G_{Rx}(s) \cdot G_x(s) = \frac{K_{Rx}}{(1 + T_{sum,x} \cdot s) \cdot s} \quad (5.6)$$

$$G_{gx}(s) = \frac{K_{Rx}}{T_{sum,x} \cdot s^2 + s + K_{Rx}} \quad (5.7)$$

Ausgelegt nach dem Symmetrischen Optimum resultiert die Verstärkung des P-Reglers:

$$K_{Rx} = \frac{1}{a \cdot T_{sum,x}} \quad (5.8)$$

Folglich ergibt sich die nachfolgende Übertragungsfunktion:

$$G_{gx}(s) = \frac{1}{a \cdot T_{sum,x}^2 \cdot s^2 + a \cdot T_{sum,x} \cdot s + 1} \quad (5.9)$$

In [Bal09] wurden unterschiedliche Verfahren zur Reglerauslegung erprobt. Die Anwendung des Symmetrischen Optimums lieferte dabei die besten Ergebnisse, da insbesondere durch den Dämpfungsparameter  $a$  die Regelung gezielt eingestellt werden kann. Zudem weist ein nach diesem Verfahren ausgelegter Regelkreis gutes Störverhalten auf.

### 5.1.3 Führungsgrößengenerator

#### Beschleunigungs- und Ruckbegrenzung

Die Geschwindigkeitsregelung stellt für die Regelung der Fahrzeugbewegung die innerste Regelschleife dar – abgesehen von der Regelung der Motorströme der Läufer und des Stators. Da lediglich die relative Änderung der Fahrzeugposition direkt gemessen wird, wird auf eine unterlagerte Kraft- bzw. Beschleunigungsregelung verzichtet. Um dennoch Komfortgrößen wie Beschleunigung und Ruck berücksichtigen zu können, wird Einfluss auf die Solltrajektorie der Position bzw. Geschwindigkeit genommen. So müssen aus möglicherweise sprungförmigen Sollgrößenvorgaben stetige, sprungfreie und koordinierte, d. h. aufeinander abgestimmte Solltrajektorien erzeugt werden, die zudem die Begrenzungen von Stellglied und Regelstrecke berücksichtigen.

Da, wie zuvor beschrieben, ein Sensor zur Erfassung der Längsbeschleunigung nicht eingesetzt wird, besteht lediglich die Möglichkeit, über den Sollwert des Geschwindigkeits-

regelkreises Einfluss auf Beschleunigung und Ruck zu nehmen. Dazu wird im Führungsgrößengenerator zunächst die Berechnung der Schrittweite  $a_{M,\text{step}}$  der Beschleunigung durchgeführt:

$$a_{M,\text{step}} = T_A \cdot r_{M,\text{max}} \quad (5.10)$$

Wobei  $T_A$  der Abtastzeit des Systems (1 ms) entspricht und  $r_{M,\text{max}}$  der vorgegebene Maximalwert des Rucks ist. In einem weiteren Schritt wird die Zeitdauer  $\Delta T_a$  der Aufsummierung bis zum geforderten Endwert der Beschleunigung berechnet:

$$\Delta T_a = \frac{a_{M,\text{max}}}{r_{M,\text{max}}} \quad (5.11)$$

Um die Sollwertvorgabe starten zu können, wird zunächst überprüft, ob ein Beschleunigungs- oder ein Bremsvorgang vorliegt oder mit konstanter Geschwindigkeit gefahren werden soll. Anhand dieses Zustands findet dann eine entsprechende Anpassung des Geschwindigkeitssollwertes statt, so dass die Beschleunigungs- und Ruckbegrenzungen eingehalten werden.

Ebenso wie für die Sollgeschwindigkeit wird auch für die Sollposition ein optimales Profil berechnet. Die Berechnung der Sollposition erfolgt in Abhängigkeit des sich aus der Geschwindigkeit ergebenden Bremsweges. In der Antriebstechnik werden häufig zeitoptimale Lageregelungen mit vorab berechneten Solltrajektorien eingesetzt. Diese Regelungen bieten allerdings den Nachteil, dass bei auftretenden, nicht einkalkulierten Störgrößen beispielsweise eine vorgegebene Beschleunigung nicht erreicht werden kann und damit die berechneten Profile nicht eingehalten werden. Die Anwendung wird dadurch insbesondere für Lageregelungen mit bewegtem Zielpunkt erschwert.

Im Schienenverkehr sind die zu befahrenden Streckenprofile relativ genau bekannt. Zudem stellen die Hangabtriebskräfte in der vorliegenden Anwendung den maßgeblichen Störgrößenanteil dar. Daher wird eine Lageregelung mit einer Bremsweganpassung vorgenommen und das Prinzip des vorausschauenden Fahrens angewendet. Dies basiert auf einer modellbasierten Prädiktion der Geschwindigkeitstrajektorie.

Um eine möglichst überschwingungsfreie Positionsregelung zu realisieren, findet eine präzise Betrachtung des Bremsweges statt. Da beim Linearmotor die Beschleunigungs- bzw. Bremskraft nicht über den Rad-Schiene-Kontakt aufgebracht wird, sind die Beschleunigungs- und Bremswege somit unabhängig von Reibkräften. Windeinflüsse werden kompensiert, indem bei der Fahrprofilgenerierung stets eine Motorkraftreserve einkalkuliert wird. Da zudem die Fahrzeugposition auf dem Fahrweg sehr exakt ermittelt

wird (vgl. Kap. 3.3), können Beschleunigungs- und Bremsweg eines Fahrzeugs zu jedem Zeitpunkt sehr genau abgeschätzt werden. Daher findet kontinuierlich eine Berechnung des aktuellen Bremsweges statt, in die der jeweilige Fahrzeugzustand (z.B. Fahrzeuggewicht) sowie das Streckenprofil (Fahrwiderstand) einfließen. Zudem ist bei der vorliegenden Anwendung zu beachten, dass z.B. im Weichenbereich anstelle des DGALM ein asynchroner Kurzschlussläufermotor (streckenseitig mit passiver Reaktionsschiene) eingesetzt wird. Da dieser nur ca. 30% der maximalen Antriebskraft des DGALM bereitstellen kann [Yan04], muss in diesen Bereichen der verlängerte Brems- bzw. Beschleunigungsweg zwingend beachtet werden.

Dementsprechend wird gemäß Kap. 2.4 die Strecke abschnittsweise unterteilt. Da für jeden Abschnitt eine bestimmte Antriebskraft für den doppelt gespeisten Linearmotor resultiert, kann eine Prädiktion des Bremsweges präzise vorgenommen werden. So können die Systemgrenzen erreicht werden.

Folglich wird für jeden zu befahrenden Abschnitt  $i$  der Bremsweg  $d_{\text{brems},i}$  berechnet aus der jeweiligen Fahrgeschwindigkeit  $v_{M,i,0}$  bei Einfahrt in einen neuen Streckenabschnitt und dem jeweiligen Sollwert der Beschleunigung:

$$d_{\text{brems},i} = \frac{v_{M,i,0}^2}{a_{M,i}^*} \quad (5.12)$$

Wobei der Bremsweg  $d_{\text{brems},i}$  auf dem Abschnitt  $i$  nicht länger sein kann als die Wegstrecke bis zum nächsten Abschnitt  $i+1$ . Ist dies jedoch der Fall, so wird die Geschwindigkeit am Ende des Abschnitts berechnet:

$$v_{M,0,i+1} = \sqrt{v_{M,0,i}^2 - 2a_{M,i} \cdot d_{\text{brems},i}} \quad (5.13)$$

Der gesamte Bremsweg berechnet sich aus der Summe der einzelnen Bremswege:

$$d_{\text{brems}} = \sum d_{\text{brems},i} \quad (5.14)$$

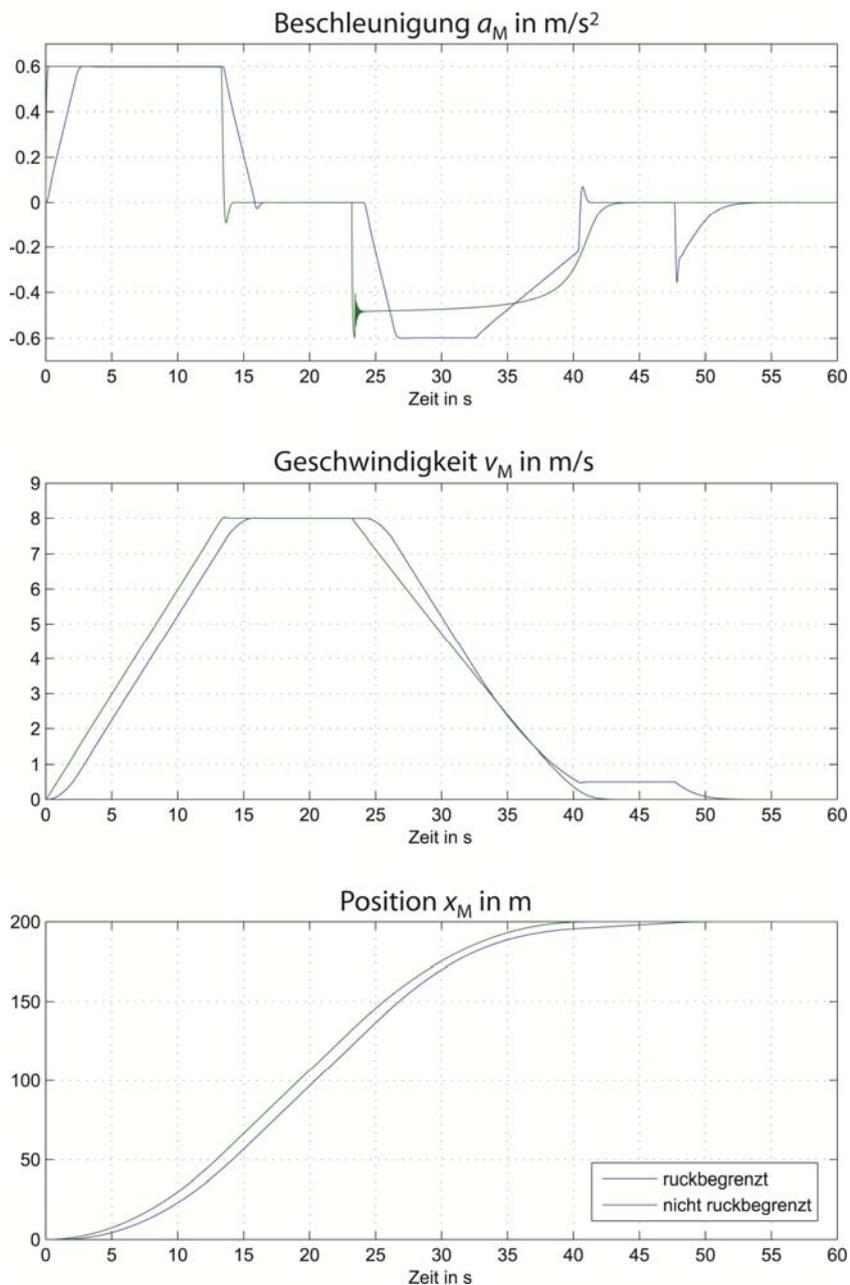
Es resultiert daraus als Führungsgröße für den Geschwindigkeitsregelkreis:

$$x_M^* = x_M^* - d_{\text{brems}} \quad (5.15)$$

Auf diese Weise wird kontinuierlich der aktuelle Bremsweg des jeweiligen Fahrzeugs berücksichtigt und ein Überschwingen des Positionsregelkreises ausgeschlossen.

Da zudem während der Zieleinfahrt eines RailCabs von der Geschwindigkeits- zur Positionsregelung umgeschaltet wird, muss eine weiche Regelerumschaltung gewährleistet werden. Dementsprechend müssen die Stellgröße des Positionsregelkreises und die Füh-

rungsgröße des Geschwindigkeitsregelkreises passend aufeinander abgestimmt werden. Um dies zu erreichen, findet im Profilgenerator der Geschwindigkeitsregelung eine Anpassung des Sollwertes statt. In Bild 5.2 ist einerseits eine nicht ruckbegrenzte und andererseits für eine ruckbegrenzte Fahrt dargestellt. Die Umschaltung von der Geschwindigkeits- zur Positionsregelung erfolgt erst wenige Meter vor der Zielposition. Zudem wird die Ruckbegrenzung kurz vor Erreichen der Zielposition deaktiviert.



**Bild 5.2** Beispielhafte Trajektorien für Beschleunigung und Geschwindigkeit

## 5.2 Regelverfahren für den Konvoibetrieb

Der Konvoibetrieb erfordert Erweiterungen der zuvor vorgestellten Längsdynamikregelung. Dazu wird die Regelungsstruktur um weitere Elemente und Funktionen ergänzt. Ebenso muss die Eigenschaft der Kolonnenstabilität geprüft werden.

### 5.2.1 Erweiterung der Längsdynamikregelung für Konvoifahrten

Es existieren unterschiedliche Möglichkeiten, Abstandsregelungen zu realisieren. Die Grundlage für eine Abstandsregelung stellt der Abstand zwischen einem Fahrzeug  $n$  und dem unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeug  $n-1$  dar:

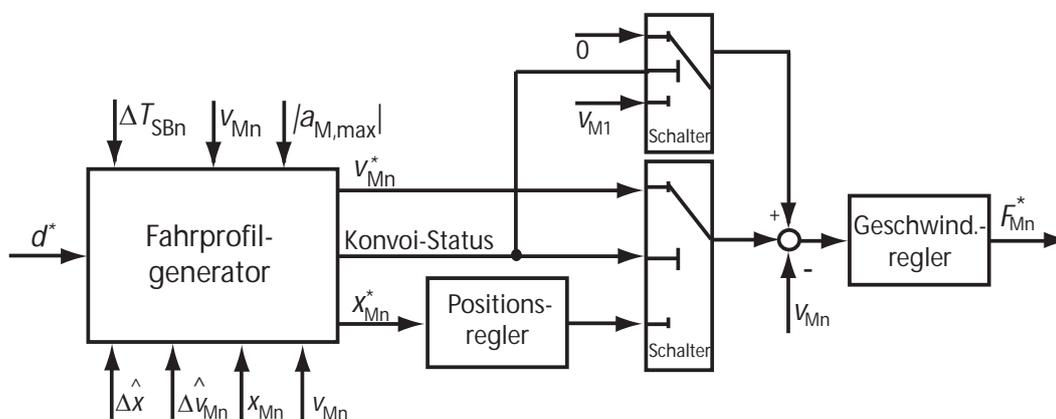
$$d = x_{Mn} - x_{Mn-1} \quad (5.16)$$

Die Abweichung zwischen diesem Istwert und dem Sollabstand stellt schließlich die Eingangsgröße des Reglers dar:

$$\Delta d = d^* - d \quad (5.17)$$

Es besteht ebenso die Möglichkeit, die Geschwindigkeitsdifferenz sowie die Beschleunigungsdifferenz zwischen den Fahrzeugen als weitere Regelgrößen zu verwenden. Da, wie zuvor bereits beschrieben, die Beschleunigung auf den Fahrzeugen nicht gemessen und daher auch nicht geregelt wird, wird der Beschleunigungsfehler hier nicht weiter betrachtet.

In Bild 5.3 ist die Struktur für die Abstandsregelung der RailCabs dargestellt. Diese Abstandsregelung basiert auf der Positionsregelung (vgl. Bild 5.1). Es werden lediglich einige Modifikationen in der Regelkreisstruktur vorgenommen, auf die nachfolgend eingegangen wird.



**Bild 5.3** Regelkreisstruktur für die Abstandsregelung

Die Reglerauslegung bleibt identisch sowohl für den Geschwindigkeits- als auch für den Positionsregelkreis. Ebenso wird die Umschaltstrategie zwischen Positions-, bzw. Abstandsregelung und Geschwindigkeitsregelung aus Kap. 5.1.4 eingesetzt. Als Regelverfahren wird eine Abstandsregelung zum unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeug angesetzt. Für den Konvoibetrieb wird der Fahrprofilgenerator erweitert. Es werden dazu weitere Berechnungsvorschriften für die Sollgrößen eingesetzt, für die zusätzlich die folgenden Systemgrößen benötigt werden:

- Position und Geschwindigkeit des unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeugs ( $x_{Mn-1}$ ,  $v_{Mn-1}$ ),
- Erforderlicher Sicherheitsabstand  $d^*$  zum unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeug,
- Geschwindigkeit  $v_{M1}$  des Führungsfahrzeugs im Konvoi (vgl. Kap. 5.2.2),

Bevor Konvoimanöver ausgeführt werden dürfen, müssen die Systemeigenschaften bzw. Systemgrenzen der beteiligten Fahrzeuge betrachtet werden. Dies geschieht während der Phase der Konvoikoordination. Diese wird jeweils vor dem Bilden oder Auflösen eines Konvois durchlaufen. Wie in Kap. 3.2.3 bereits beschrieben wurde, werden folgende Werte dabei festgelegt:

- Fahrgeschwindigkeit des Führungsfahrzeugs  $v_{M1}^*$
- Systembegrenzungen der im Konvoi betriebenen Fahrzeuge im Normalbetrieb ( $|v_{M,max}|$ ,  $|a_{M,max}|$ )
- Zeitverzögerungen im Falle von Schnellbremsungen ( $\Delta T_{SBn}$ ).

Unterschiedliche Fahrzeugeigenschaften finden dabei Berücksichtigung, indem Fahrzeugmasse und installierte Antriebskraft des Motors in die Berechnungen einfließen (vgl. Gl. 3.6). Eine Schnellbremsung wird folglich immer von hinten nach vorne eingeleitet, so dass vorab definierte Bremskorridore entstehen, die sich auch bei Parameterschwankungen nicht überschneiden.

### Sollwertgenerierung für Konvoifahrten

Als Erweiterung der Positionsregelung ist die Abstandsregelung zu sehen. Prinzipiell handelt es sich dann um eine Lageregelung mit bewegtem Zielpunkt. D. h. die Sollposition des Folgefahrzeugs wird anhand der Istposition des unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeugs nachgeführt:

$$x_{Mn}^* = x_{Mn-1} - d^* \quad (5.18)$$

Weiterer Bestandteil in der Berechnung der Sollposition ist der Sollabstand  $d^*$  zwischen den Fahrzeugen. Dieser wird abhängig vom Regelverfahren entweder als konstant oder als Funktion der Fahrzeuggeschwindigkeiten bzw. weiterer fahrzeugspezifischer Daten angesetzt [May01]:

$$d^* = f(v_{Mn}, v_{Mn-1}, a_{Mn,max}, a_{Mn-1,max}) \quad (5.19)$$

Der Sollabstand der Fahrzeuge wird so gewählt, dass ein sicherer Betrieb gewährleistet werden kann. Unter normalen Betriebsbedingungen werden geringe Abstände (hier: ein Meter) eingeregelt. Bei Betriebsstörungen werden jedoch unter Umständen von der Fahrgeschwindigkeit abhängige Sollabstände vorgegeben.

Im Sollwertgenerator (siehe Bild 5.3) wird zudem der Regelungsmodus festgelegt. Dazu wird die Zustandsvariable KONVOI-STATUS erzeugt, durch die die Abstandsregelung aktiviert werden kann. Die unterschiedlichen Modi der Konvoifahrt werden in Kap. 5.3 beschrieben.

## Vorsteuerung

Durch die Regelung bezüglich eines bewegten Zielpunktes ist eine Vorsteuerung mit der Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs zwingend erforderlich, um stationäre Genauigkeit gewährleisten zu können [Leo76]. Daher wird, sobald das Folgefahrfahrzeug sich im Modus der Abstandsregelung befindet, die Vorsteuerung aktiviert. Das dynamische Verhalten des Konvois wird zudem verbessert, indem die Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs als Vorsteuergröße für alle Fahrzeuge im Konvoi eingesetzt wird. Die Stabilität der Regelstrecke wird nicht beeinflusst, da die Vorsteuerung nur von den Sollwerten abhängt und keine Rückführung von Streckenzuständen enthält. Zudem wird mittels der Vorsteuerung der Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs Kolonnenstabilität erreicht. Dies wird nachfolgend beschrieben.

### 5.2.2 Stabilität der Abstandsregelung

Nach [SH99] müssen drei Kriterien erfüllt werden, um die Stabilität einer Abstandsregelung nachzuweisen. Grundvoraussetzung ist die Stabilität des einzelnen Fahrzeugs, die durch das Ein- und Ausgangsverhalten geprüft wird. Ein Fahrzeug muss jeder begrenzten Geschwindigkeitsvorgabe mit einem begrenzten Fehler folgen können. Dies wird hier durch die Stabilität der Geschwindigkeits- bzw. Positionsregelung gewährleistet.

Das zweite Beurteilungskriterium für eine Abstandsregelung ist die Kolonnenstabilität. Diese sagt aus, ob sich eine Änderung der Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs so auf die Folgefahrzeuge auswirkt, dass deren Reaktionen zum Ende des Konvois hin immer mehr abnehmen. Bei einer instabilen Kolonne, verstärkt sich beispielsweise das Bremsmanöver des Führungsfahrzeugs so stark, dass hintere Fahrzeuge sehr stark abbremsen und sogar zum Stillstand kommen. Das dritte Kriterium fordert keine bleibende Regelabweichung im stationären Zustand. Alle Fahrzeuge müssen den geforderten Sollabstand einregeln können.

### Nachweis der Kolonnenstabilität

Nach [Cre92] und [SH99] existiert lediglich eine notwendige Bedingung zum Nachweis von Kolonnenstabilität. Dazu kann das Amplitudenverhältnis der Geschwindigkeiten zwischen den Folgefahrzeugen und dem Führungsfahrzeug betrachtet werden:

$$k = \frac{|v_n(j\omega)|}{|v_1(j\omega)|} = |G(j\omega)|^{n-1} \quad n \in \{2..N\} \quad (5.20)$$

Ausgangspunkt für diese Untersuchungen ist beispielsweise ein sinusförmiges Geschwindigkeitsprofil des Führungsfahrzeugs  $v_1(t)$  mit der Amplitude  $A$  und der Frequenz  $\omega$ :

$$v_1(t) = A \cdot \sin(\omega t) \quad (5.21)$$

Dieser Geschwindigkeitsverlauf führt bei den Folgefahrzeugen ebenfalls zu sinusförmigen Fahrprofilen:

$$v_n(t) = A \cdot \sin(\omega t - \varphi) \cdot |G(j\omega)|^n \quad (5.22)$$

Damit ist es nicht zu einer Verstärkung des Signals entlang der Kolonne kommt, muss gelten:

$$|G(j\omega)| \leq 1 \quad \forall \omega \geq 0 \quad (5.23)$$

Wäre Gl. 5.23 nicht erfüllt, würden sich Regelfehler und Stellgrößen nachfolgender Fahrzeuge infolge von Anregungen des Führungsfahrzeugs nach hinten verstärken.

Ausgangspunkt für eine Untersuchung der Kolonnenstabilität der RailCabs ist das Übertragungsverhalten zwischen zwei Fahrzeugen. Dies ist gekennzeichnet durch die Übertragungsfunktion des Geschwindigkeitsregelkreises und das Totzeitverhalten der Funkkommunikation zwischen den Fahrzeugen:

$$\frac{|v_n(j\omega)|}{|v_{n-1}(j\omega)|} = |G_{\text{gvn}}(j\omega) \cdot e^{-j\omega T_{\text{imerB}}}| \leq 1 \quad (5.24)$$

Eine Überprüfung von Gl. 5.24 kann beispielsweise im Bode-Diagramm vorgenommen werden. Im vorliegenden Fall ist das notwendige Kriterium nach Gl. 5.23 erfüllt.

[Geh00] kommt zu dem Ergebnis, dass insbesondere Kriterien zum Nachweis der Kolonnenstabilität in der Praxis meist aufgrund von Störeinflüssen nicht gänzlich erfüllt werden können. Aus der Literatur ([IC93], [Sch07], [SD93], [ZEA03]) ist zudem bekannt, dass Kolonnenstabilität wesentlich von der Art des Informationsflusses im Konvoi abhängt.

### Informationsfluss im Konvoi

Nach [ZEA03] werden hinsichtlich des Informationsflusses im Konvoi drei Möglichkeiten unterschieden:

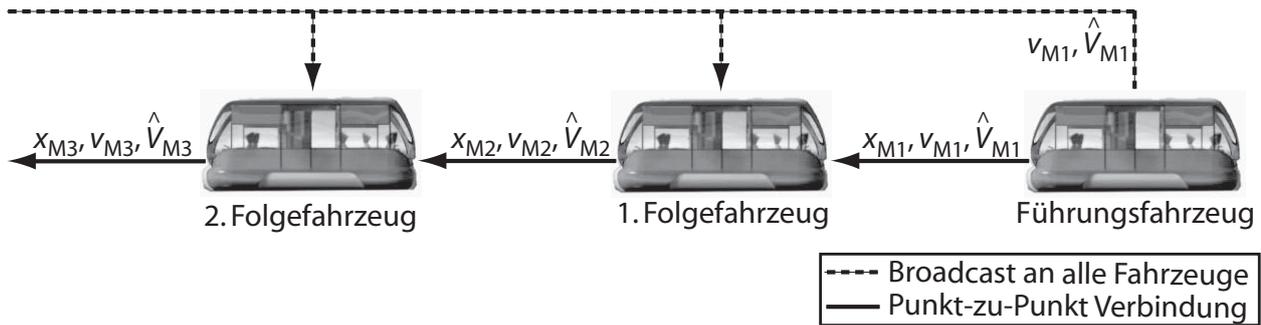
- Es werden nur Informationen vom vorausfahrenden Fahrzeug empfangen.
- Es werden Informationen sowohl vom vorausfahrenden Fahrzeug als auch vom Führungsfahrzeug empfangen.
- Informationen werden von allen vorausfahrenden Fahrzeugen empfangen.

Im Falle einer einfachen Informationsverkettung stehen lediglich Informationen des vorausfahrenden Fahrzeugs zur Verfügung, so dass sich das Folgefahrzeug nur an diesem orientieren kann. Nach [IC93] und [SD93] kann bei konstanten Sollabständen kein kolonnenstabiles Verhalten erreicht werden. Wird der Sollabstand geschwindigkeitsabhängig vorgegeben, so wird zwar Kolonnenstabilität erreicht, aber es werden insbesondere bei höheren Fahrgeschwindigkeiten relativ große Fahrzeugabstände erforderlich.

Wird jedoch zumindest auch die Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs an alle nachfolgenden Fahrzeuge übermittelt, können diese mit moderatem Stellaufwand auf Änderungen des Bewegungsablaufs reagieren. [Shl78] und [SD92] weisen mit dieser Art des Informationsflusses Kolonnenstabilität auch bei konstanten Sollabständen nach.

Weitere Möglichkeiten des Informationsflusses bestehen darin, mit allen vorausfahrenden Fahrzeugen zu kommunizieren. Dies erhöht jedoch den Kommunikationsaufwand erheblich und bietet hinsichtlich der Kolonnenstabilität keine weiteren Vorteile.

In Bild 5.4 ist der Informationsfluss für Konvoibetrieb der RailCabs dargestellt. Durch eine sogenannte Broadcast-Funktion erhält jedes Folgefahrzeug vom Führungsfahrzeug die Geschwindigkeit mitgeteilt, so dass Fahrmanöver des Führungsfahrzeugs schnell von allen Fahrzeugen erkannt werden können.



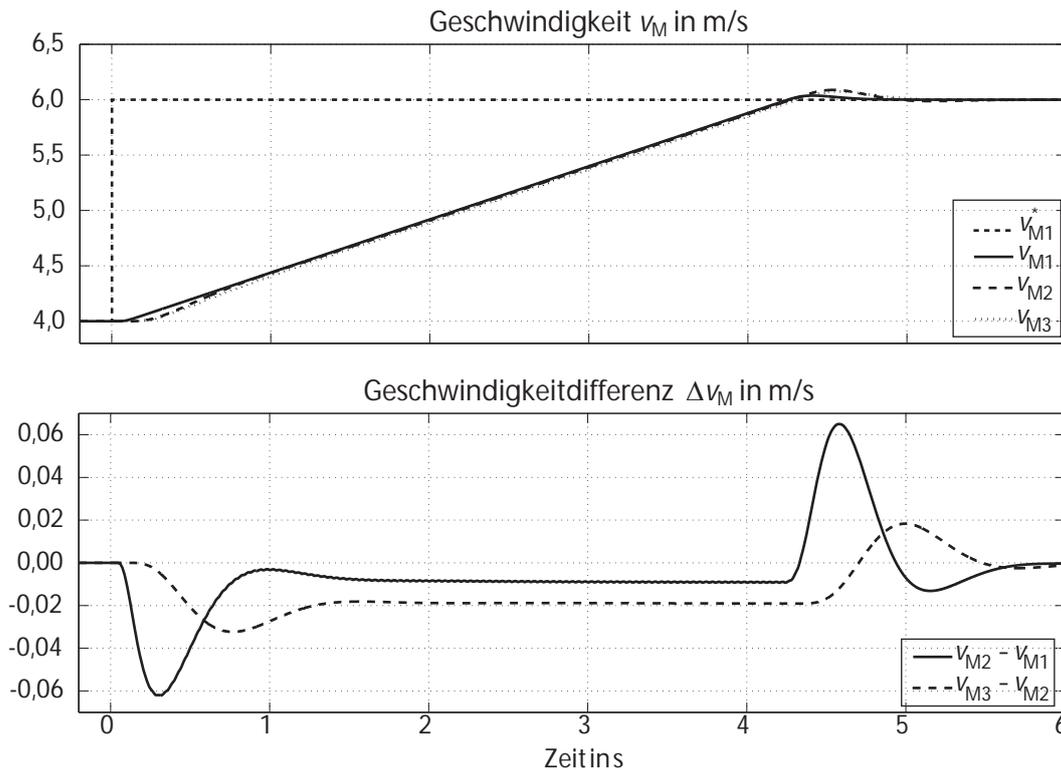
**Bild 5.4 Informationsfluss im Konvoibetrieb**

Die in Bild 5.4 dargestellte Kommunikationsstruktur reicht für die Abstandsregelung aus, da nur die Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs zusätzlich mit in das Regelgesetz jedes Folgefahrzeugs einfließt. Die in Kap. 3 beschriebene Betriebsleittechnik sieht diese Möglichkeit der Kommunikation vor. Folglich kann über die Broadcast-Kommunikation sichergestellt werden, dass im Störfall ein koordiniertes Fahrverhalten einsetzt.

### Prüfung der Kolonnenstabilität

Ein allgemein gültiger Nachweis der Kolonnenstabilität kann meist nicht erbracht werden. Kolonnenstabilität wird daher häufig mittels Simulationen überprüft und sollte in den Simulationen deutlich sichtbar sein.

Bild 5.5 zeigt ein simuliertes Beschleunigungsmanöver des Führungsfahrzeugs für einen Konvoi mit insgesamt drei Fahrzeugen. Hinsichtlich der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation wird die Broadcast-Funktion verwendet. Da die auftretenden Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen dem dritten und dem zweiten Fahrzeug geringer sind als die zwischen dem ersten und dem zweiten, zeigt sich hier Kolonnenstabilität.



**Bild 5.5** Simulationsergebnisse zur Prüfung der Kolonnenstabilität

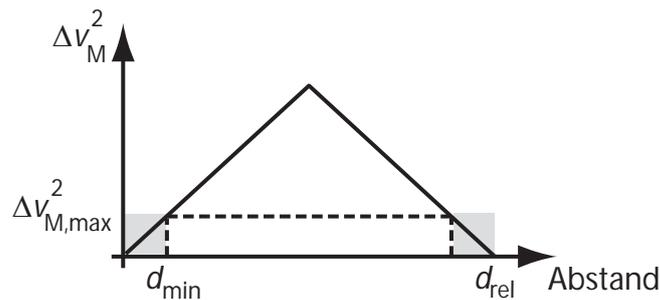
## 5.3 Optimale Konvoifahrten

Der Konvoibetrieb erfordert neben der Abstandsregelung (siehe Kap. 5.2) sowie der Konvoikoordination (siehe Kap. 3.2.3) weitere Funktionen, die überhaupt erst das Zusammenfügen bzw. das Auflösen von Fahrzeugkonvois ermöglichen. Diese werden nachfolgend erläutert.

### 5.3.1 Reduzierung der Aufprallstärke bei Fahrzeugkollisionen

Die Betrachtung der Streckenkapazität  $N_{\max}$  in Kap. 1 hat gezeigt, dass die Fahrzeuge möglichst schnell und mit kurzen Abständen betrieben werden müssen, um einen hohen Fahrzeugdurchsatz zu erzielen. Die Forderungen nach möglichst hoher Geschwindigkeit bei geringstmöglichen Fahrzeugabständen sind aus Sicht der Betriebssicherheit prinzipiell konträr. Daher ist eine Betriebsstrategie erforderlich.

Die Aufprallenergie zwischen zwei Fahrzeugen ist proportional zum Quadrat der Differenzgeschwindigkeit der Fahrzeuge. In Bild 5.6 ist die Aufprallstärke in Abhängigkeit zum Fahrzeugabstand für den Fall dargestellt, dass ein Folgefahrzeug auf eine Bremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs nicht angemessen reagieren kann.



**Bild 5.6** Prinzipieller Verlauf der Aufprallenergie nach [Ioa97]

Daraus lassen sich prinzipiell zwei Möglichkeiten für eine sichere Konvoifahrt ableiten. Einerseits kann ein Sicherheitsabstand gewählt werden, der größer als der relative Bremswegabstand  $d_{\text{rel}}$  des Folgefahrzeuges ist. Als relativer Bremswegabstand ist die Differenz der Bremswege von Folgefahrzeug und Führungsfahrzeug definiert. Folglich kann zwar eine Kollision gänzlich vermieden werden, jedoch sinkt damit die Streckenkapazität und der Effekt der Windschattenfahrt der Folgefahrzeuge kommt unter Umständen nicht mehr zur Geltung. Eine Verringerung des Sicherheitsabstands führt zunächst zu einer Erhöhung der Aufprallstärke. Jedoch nimmt diese ab einem bestimmten Wert wieder ab, da sich hinsichtlich einer potenziellen Kollision die Aufprallgeschwindigkeit wieder verringert. Wird also ein geringer Abstand ( $d < d_{\min}$ ) eingeregelt, so ist die potenzielle Aufprallstärke wiederum geringer als die tolerierbare Aufprallstärke. Folglich sollten innerhalb einer Fahrzeugkolonne Abstände kleiner  $d_{\min}$  und zwischen Kolonnen Abstände größer als die relative Bremswegdifferenz  $d_{\text{rel}}$  eingehalten werden. Die tolerierbare Aufprallstärke hängt dabei von den Fahrzeugeigenschaften ab. Für das Bilden und Auflösen von Fahrzeugkonvois bedeutet dies zudem, dass die Differenzgeschwindigkeiten unbedingt eingegrenzt werden müssen, wenn sich ein Folgefahrzeug innerhalb des relativen Bremsabstands zum vorausfahrenden Fahrzeug befinden.

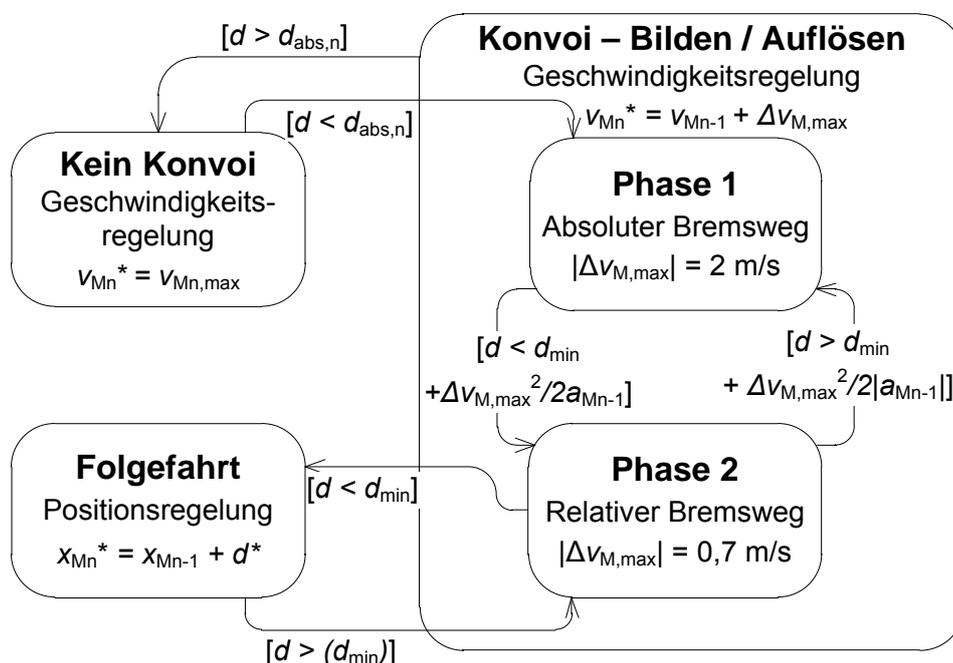
Bedingt durch die Fahrzeugkonstruktion muss eine mögliche Aufprallgeschwindigkeit auf höchstens 1 m/s begrenzt werden, um Folgeschäden am Fahrzeug ausschließen zu können. Werden zudem noch die Tot- und Verzögerungszeiten des Systems berücksichtigt, die sich aus der Funkkommunikation, der Umfelderkennung und der Ansprechzeit der hydraulischen Schnellbremseinrichtung ergeben, so muss dieser Wert für die Vorgänge der Konvoibildung bzw. der Auflösung weiter reduziert werden. In dieser Arbeit wird die zulässige Differenzgeschwindigkeit auf 0,7 m/s für Fahrten innerhalb des relativen Bremswegabstands eingegrenzt. Die daraus resultierende Aufprallenergie kann durch an den Fahrzeugen angebrachte Puffer abgefangen werden.

### 5.3.2 Regelstrategien für autonome Konvoifahrten

Hinsichtlich der Fahrmanöver werden drei unterschiedliche Betriebsstrategien eingesetzt [HTS+08a]. Unterschieden wird dabei zwischen der Konvoibildung, der Folgefahrt mit festem Abstand und dem Auflösen eines Konvois. Im Regelmodell der RailCabs wird dies durch einen Zustandsautomaten realisiert, der in Bild 5.7 dargestellt ist und im Folgenden beschrieben wird.

#### Kein Konvoi

Im Betriebsmodus KEIN KONVOI ist die Geschwindigkeitsregelung aktiviert. Da sich das Folgefahrzeug außerhalb des absoluten Bremsweges zum vorausfahrenden Fahrzeug befindet, ist der Betriebszustand völlig unkritisch. Das Folgefahrzeug kann in jedem Fall rechtzeitig zum Stillstand kommen und ist vollkommen unabhängig hinsichtlich der Fahrmanöver des Führungsfahrzeugs. Eine Absprache zwischen den Fahrzeugen über bevorstehende Fahrmanöver ist dementsprechend nicht erforderlich. Für die Geschwindigkeitsregelung können der maximal zulässige Sollwert gewählt und ein ruck- und beschleunigungsbegrenztes Fahrprofil problemlos eingesetzt werden.



**Bild 5.7** Zustandsautomat für die Konvoifahrt

## Konvoi – Bilden / Auflösen

Während der Konvoibildung bleibt die Geschwindigkeitsregelung aktiviert. Der Geschwindigkeitssollwert für das Folgefahrzeug wird nun jedoch durch eine Begrenzung der Differenzgeschwindigkeit zum Führungsfahrzeug bestimmt.

PHASE 1 der Konvoibildung setzt ein, wenn der absolute Bremsweg  $d_{\text{abs},n}$  des Folgefahrzeugs  $n$  unterschritten wird:

$$d \leq (d^* + d_{\text{abs},n} = \frac{v_{\text{Mn}}^2}{2|a_{\text{Mn}}|}) \quad (5.25)$$

Diese Phase ist noch als unkritisch anzusehen. Dennoch wird die zulässige Geschwindigkeitsdifferenz auf 2 m/s eingeschränkt. Eine Überwachung der Bremswege beteiligter Fahrzeuge ist nun zwingend erforderlich.

PHASE 2 der Konvoibildung beginnt sobald ein sicherheitskritischer Fahrzeugabstand (relativer Bremswegabstand) unterschritten wird:

$$d \leq (d^* + \frac{\Delta v_{\text{M,max}}^2}{2|a_{\text{Mn,max}}|}) \quad (5.26)$$

Ab diesem Zeitpunkt setzt ein kritisches Fahrmanöver ein. Da nun eine Fahrzeugberührung im Störfall nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, muss dafür gesorgt werden, dass eine mögliche Aufprallgeschwindigkeit so gering ist, dass keine Gefahr besteht und auch keine bleibenden Fahrzeugschäden zu erwarten sind. Aus diesem Grund wird die zuvor bereits beschriebene Differenzgeschwindigkeit von 0,7 m/s zugelassen.

## Folgefahrt

Erst kurz bevor der Sollabstand erreicht wird, wird die Abstandsregelung aktiviert und der Modus FOLGEFAHRT setzt ein. Im Umschaltvorgang zwischen den Reglern für Abstand bzw. Position und Geschwindigkeit muss dafür gesorgt werden, dass keine Sprünge in den Regelgrößen auftreten, da dies zu einem Rucken des Fahrzeugs führen würde (vgl. Kap 5.1.3). Aus diesem Grund muss die Führungsgröße des Abstandsreglers bei dessen Zuschaltung so gewählt werden, dass der Ausgang des Geschwindigkeitsreglers nicht springt. Dies wird durch rampenförmige Veränderungen der Führungsgröße des Geschwindigkeitsregelkreises im Profilgenerator realisiert.

Das Auflösen eines Konvois erfolgt in umgekehrter Reihenfolge wie der Bildungsprozess. Dabei werden die gleichen Phasen durchlaufen. Zu berücksichtigen ist hierbei je-

doch, dass jeweils eine zusätzliche Wegdifferenz in den Transitionsbedingungen enthalten ist, um ein möglicherweise permanentes Umschalten zwischen den Zuständen zu unterdrücken.

### 5.3.3 Generierung quasi-kontinuierlicher Daten mittels modellbasierter prädiktiver Verfahren

Eine abstandsgeregelte Fahrzeugkolonne stellt ein über ein Netzwerk geregeltes System dar. Für die Regelung in vernetzten Systemen ist es wünschenswert, dass die Abtastzeit des Systems größer oder gleich der Übertragungsdauer der Funkkommunikation ist. Dies ist bei der Abstandsregelung im Konvoi nicht möglich. Da dennoch für jeden Abtastschritt neue Abstands- bzw. Geschwindigkeitsinformationen vorliegen müssen, ist es erforderlich, eine quasi-kontinuierliche Datengenerierung vorzunehmen.

Die Abstandsregelung des Folgefahrzeugs  $n$  beruht auf Zustandsdaten des jeweils vorausfahrenden Fahrzeugs  $n-1$ . Da diese Zustandsdaten  $(v_{Mn-1}, x_{Mn-1})$  lediglich in einem festen Zeitraster von 20 ms versendet werden können (vgl. Kap. 3.2.2), müssen die Zustandsdaten geschätzt werden, um quasi-kontinuierliche Daten im 1 ms-Takt der Regelung zu erhalten und den ansonsten entstehenden Regelfehler (maximal 20 cm bei einer Maximalgeschwindigkeit von 10 m/s und einer Verzögerungszeit von  $T_{\text{timerB}} = 20$  ms) zu reduzieren. Es existieren zwei Möglichkeiten zur Realisierung eines Zustandsschätzers:

- Das Folgefahrzeug schätzt unter Kenntnis der Fahrzeugdynamik die benötigten Zustände [LYB+06].
- Das vorausfahrende Fahrzeug prädiziert seine zukünftigen Zustände und übermittelt diese Informationen vorab an das nachfolgende Fahrzeug [HL08].

Die Zustandsschätzung durch das Folgefahrzeug ist ausreichend, um im angegebenen Zeitintervall der Funkübertragung von  $T_{\text{timerB}} = 20$  ms quasi-kontinuierliche Zustandswerte zu erzeugen. Die Schätzung erfolgt ausgehend von der bekannten Verzögerungszeit  $T_{\text{timerB}}$  multipliziert mit der Fahrgeschwindigkeit aus dem vorherigen Datentelegramm zum Zeitpunkt  $T$  des vorausfahrenden Fahrzeugs. Für den anzusetzenden Positionswert zum Zeitpunkt  $t$  gilt dann:

$$\hat{x}_{Mn-1}(t) = x_{Mn-1}^T + (t - t^T)v_{Mn-1}^T \quad (5.27)$$

$$\text{Mit: } t - t^T \leq T_{\text{timerB}}$$

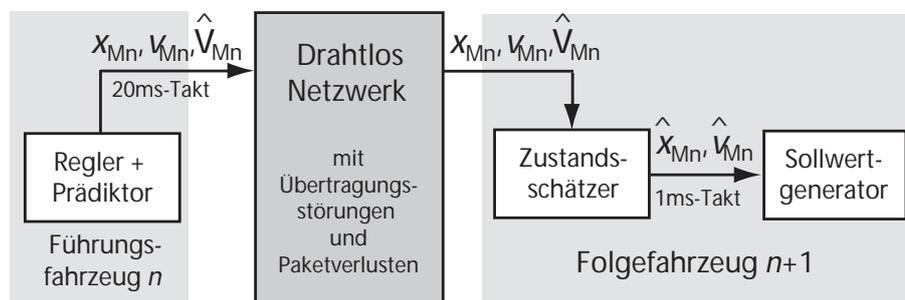
Nachteilig wirkt sich dabei jedoch aus, dass Änderungen der Geschwindigkeitstrajektorie nicht berücksichtigt werden. Mit einer angenommenen Bremsverzögerung bzw. Beschleunigung von maximal  $1 \text{ m/s}^2$  beträgt dieser Geschwindigkeitsfehler höchstens  $0,02 \text{ m/s}$ , woraus ein zu vernachlässigender Regelfehler resultiert. Die maximal mögliche Differenz zwischen Schätzwert und tatsächlichem Zustand muss dann als zusätzlicher Sicherheitsabstand berücksichtigt werden:

Da die gewählte Informationsstruktur eine relativ große Übertragungsbandbreite bietet, kann aber zusätzlich das vorausfahrende Fahrzeug weitere Zustandsinformationen an das Folgefahrzeug versenden. Dies ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn es zu Übertragungsstörungen auf der Funkstrecke kommt. Somit kann anhand der Zustandsüberwachung der Funkstrecke (siehe Kap. 3.2.4) geeignet auf Paketausfälle reagiert werden [HTS+08a].

Dazu wird der Regler der Fahrzeuglängsdynamik um einen Prädiktor erweitert. Dieser schätzt a-priori den Verlauf der Geschwindigkeit für einen Prädiktionshorizont mit der Länge der in der Funkabbrucherkennung vereinbarten Zeit (hier: 20 Übertragungszyklen). Diese prädizierte Trajektorie wird als Vektor ebenfalls an das Folgefahrzeug übertragen [HL08]:

$$\hat{V}_{Mn-1} = [\hat{v}_{Mn-1}, \hat{v}_{Mn-1}^T, \hat{v}_{Mn-1}^{2T}, \dots, \hat{v}_{Mn-1}^{20T}] \quad (5.28)$$

Treten nachfolgend Übertragungsfehler auf, kann anhand des prädizierten Geschwindigkeitsverlaufs der Schätzfehler verringert werden. Die erweiterte Kommunikationsstruktur der Datenübertragung vom Führungsfahrzeug zum Folgefahrzeug ist in Bild 5.8 dargestellt.



**Bild 5.8** Netzwerk geregeltes System mit Prädiktor und Zustandsschätzer

Auf diese Art und Weise kann die Abstandsregelung des Folgefahrzeugs optimiert werden. Dieses Verfahren ist vor allem dann effektiv, wenn keine konstante Geschwindigkeit eingeregelt wird, sondern ein Profil mit Beschleunigungs- bzw. Bremsvorgängen abgefahren wird.

Die Berechnung der Geschwindigkeitstrajektorie erfolgt unter Einbeziehung der kinematischen Beziehungen:

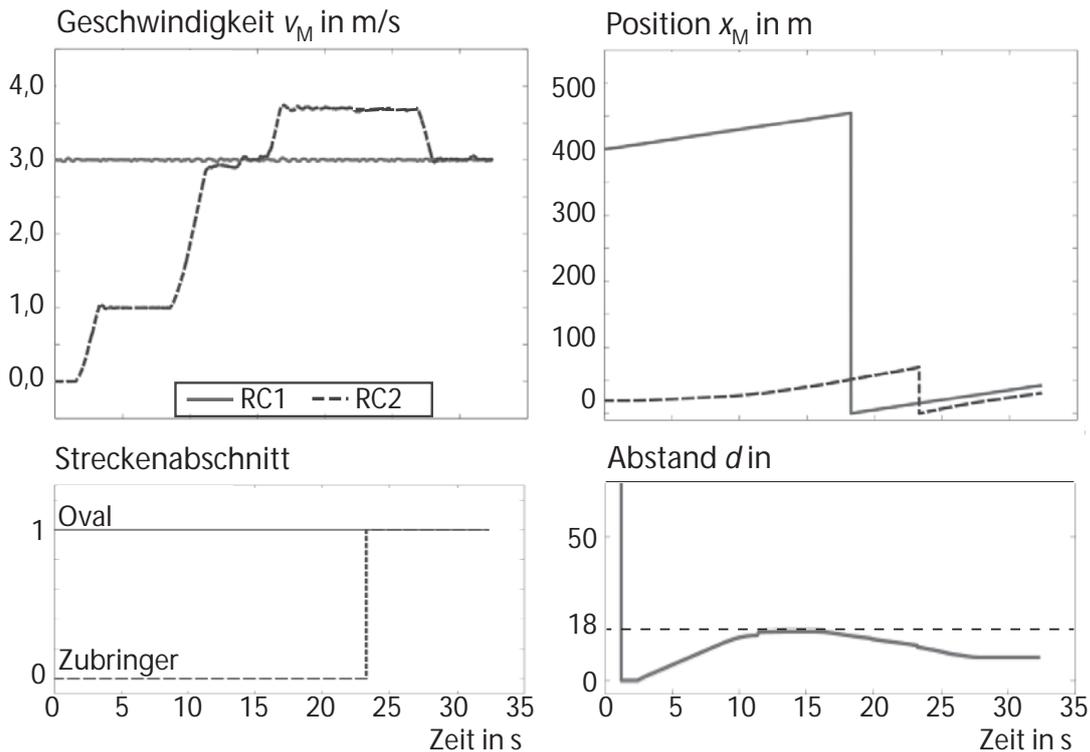
$$\hat{v}_{Mn-1}^T = v_{Mn-1} + a_{Mn-1} \cdot T \quad (5.29)$$

$$\hat{v}_{Mn-1}^{2T} = \hat{v}_{Mn-1}^T + \hat{a}_{Mn-1}^T \cdot T \quad (5.30)$$

Wird eine Beschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$  angenommen ergeben sich daraus über den Zeithorizont von 400 ms eine Geschwindigkeitsänderung von 0,2 m/s und ein Positionsfehler von 8 cm. Dieser Fehler ist zwar relativ gering. Jedoch werden dadurch sprunghafte Änderungen des Istwertes der Position weitestgehend vermieden, wodurch die Ausregelvorgänge reduziert werden. Detaillierte Untersuchungen hierzu sind in [Rad08] dargestellt. Dort wurde zudem der Einsatz eines Kalman-Filters zur Positionsschätzung genauer untersucht. Der Einsatz eines Kalman-Filters ist hier prinzipiell möglich. Die Einschränkung dieses Verfahrens liegt jedoch darin, dass dadurch eine Phasen- und damit folglich eine Zeitverzögerung entsteht.

## 5.4 Ergebnisse der Versuchsfahrten

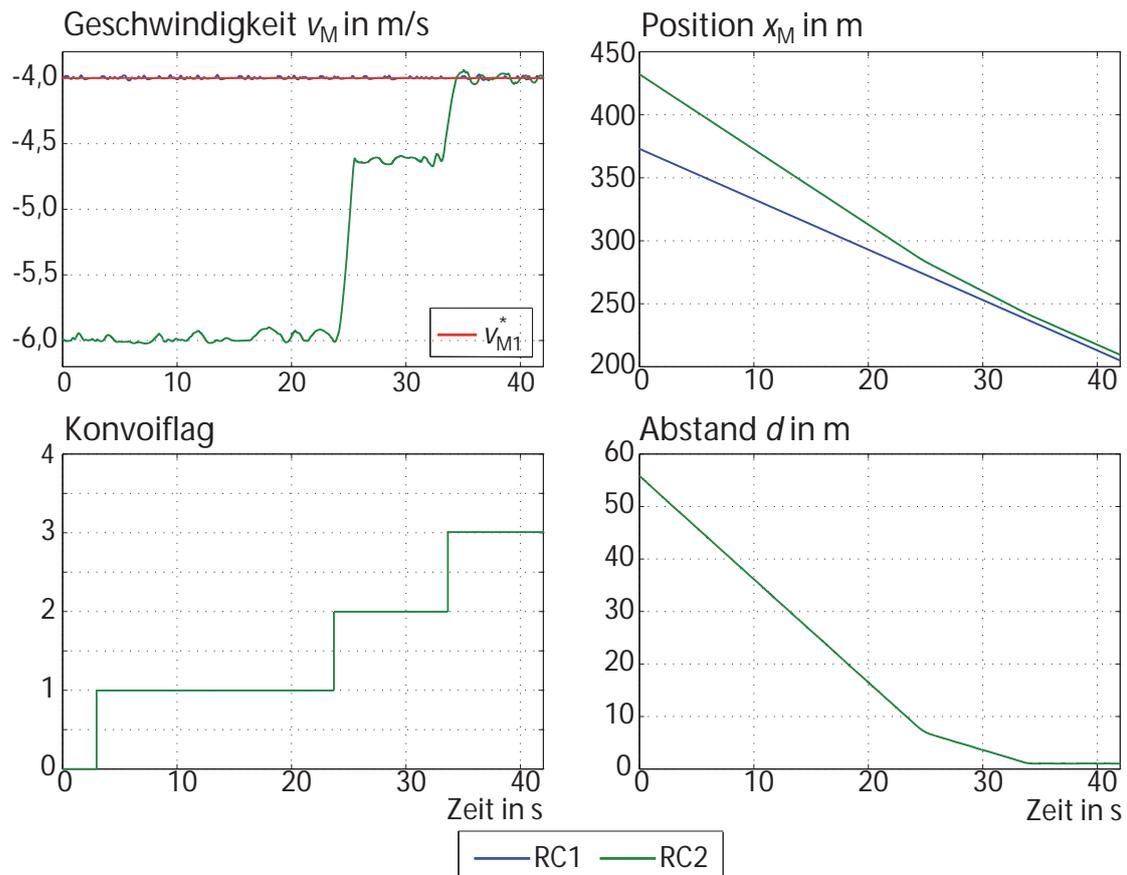
In Bild 5.9 ist eine Konvoibildung der zwei Versuchsfahrzeuge an der Weiche der Teststrecke dargestellt. Bei diesem Fahrmanöver wartet das spätere Folgefahrzeug (RailCab 2) zunächst auf dem Streckenabschnitt Zubringer, bis sich das Führungsfahrzeug (RailCab 1) der Weiche nähert. Da sich das Folgefahrzeug näher an der Weiche befindet als das Führungsfahrzeug, wird ein großer Abstand angegeben. Haben beide Fahrzeuge den gleichen Abstand zur Weiche ( $d = 0$  in Bild 5.10), beschleunigt RailCab 2 auf 3 m/s fahren und beide Fahrzeuge bewegen sich mit gleicher Geschwindigkeit auf die Weiche zu. Dabei wird ein Abstand von ca. 18 m eingestellt. Dieser Wert ergibt sich nach [Wot10] aus der Überlappung der Lichtraumprofile während der Weichendurchfahrt sowie einer Sicherheitsreserve von 9 m. Nach dem Durchfahren der Weiche beschleunigt RailCab 2 bis zu einer Differenzgeschwindigkeit von 0,7 m/s und schließt auf bis zum Erreichen des Sollabstandes.



**Bild 5.9 Konvoibildung an einer Weiche [Wot10]**

In [Wot10] sind detaillierte Untersuchungen der Weichendurchfahrt dargestellt. Dabei wurden sowohl die Fahrzeug- als die Weichengeometrie exakt abgebildet. Resultat dieser Arbeit sind die minimalen Fahrzeugabstände im Weichenbereich, mit denen Überlappungen der Lichtraumprofile während Weichenfahrten ausgeschlossen werden können.

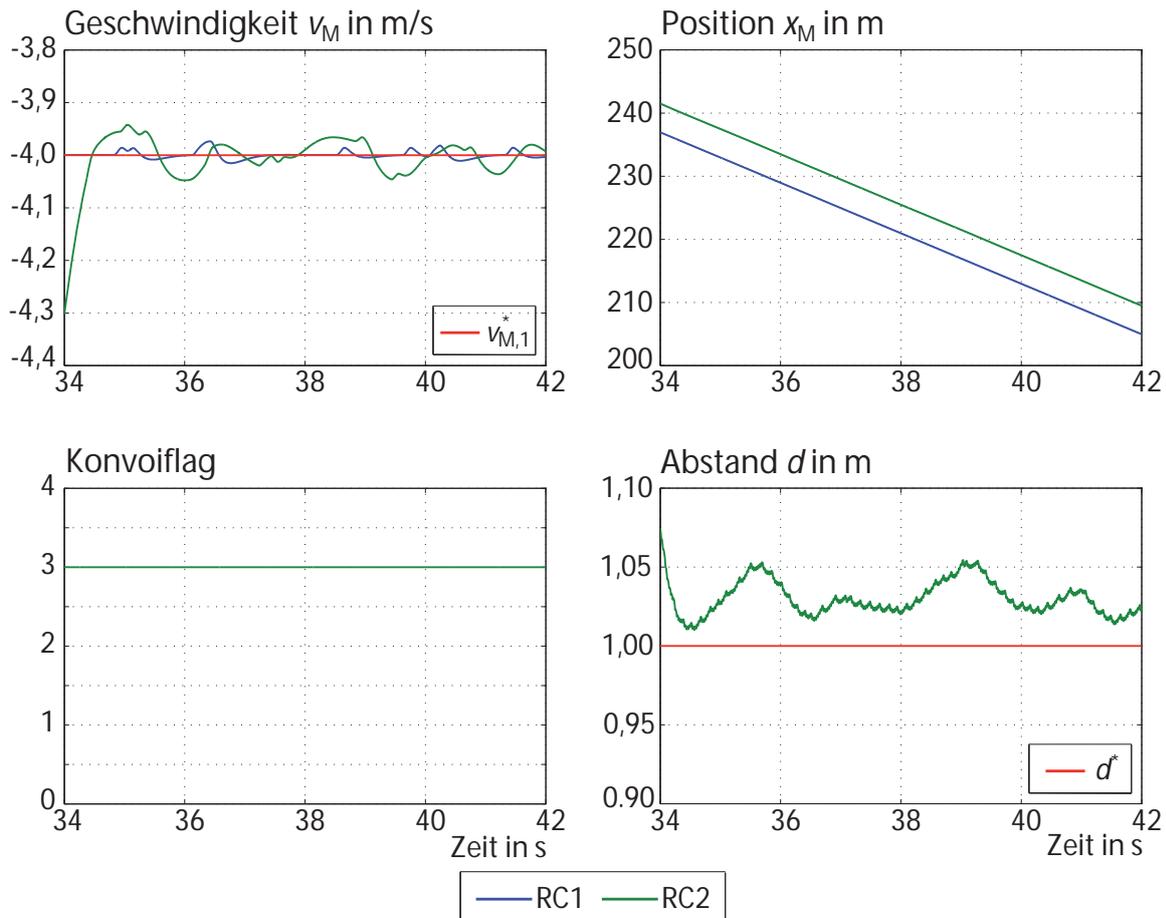
Bild 5.10 zeigt eine Konvoibildung der zwei Versuchsfahrzeuge auf dem Streckenoval der Teststrecke. Dargestellt sind die einzelnen Phasen während der Konvoibildung. Nachdem das Konvoimanöver zwischen den Fahrzeugen per Funkkommunikation abgestimmt ist und der Abstand zwischen den Fahrzeugen dem absoluten Bremsweg des Folgefahrzeugs entspricht, wird das Konvoiflag auf den Wert 1 gesetzt. Daraufhin nähert sich RailCab 2 dem Führungsfahrzeug mit einer Differenzgeschwindigkeit von 2 m/s an. Nach Erreichen des kritischen Abstandes (hier: ca. 15 m) wird die Differenzgeschwindigkeit auf 0,7 m/s verringert (Konvoiflag: Wert 2). Kurz vor Erreichen des Sollabstandes wird die Folgefahrt aktiviert (Konvoiflag: Wert 3). Das beschriebene Fahrmanöver beginnt bei ca. 3 s und endet bei ca. 35 s.



**Bild 5.10 Konvoibildung der zwei Versuchsfahrzeuge**

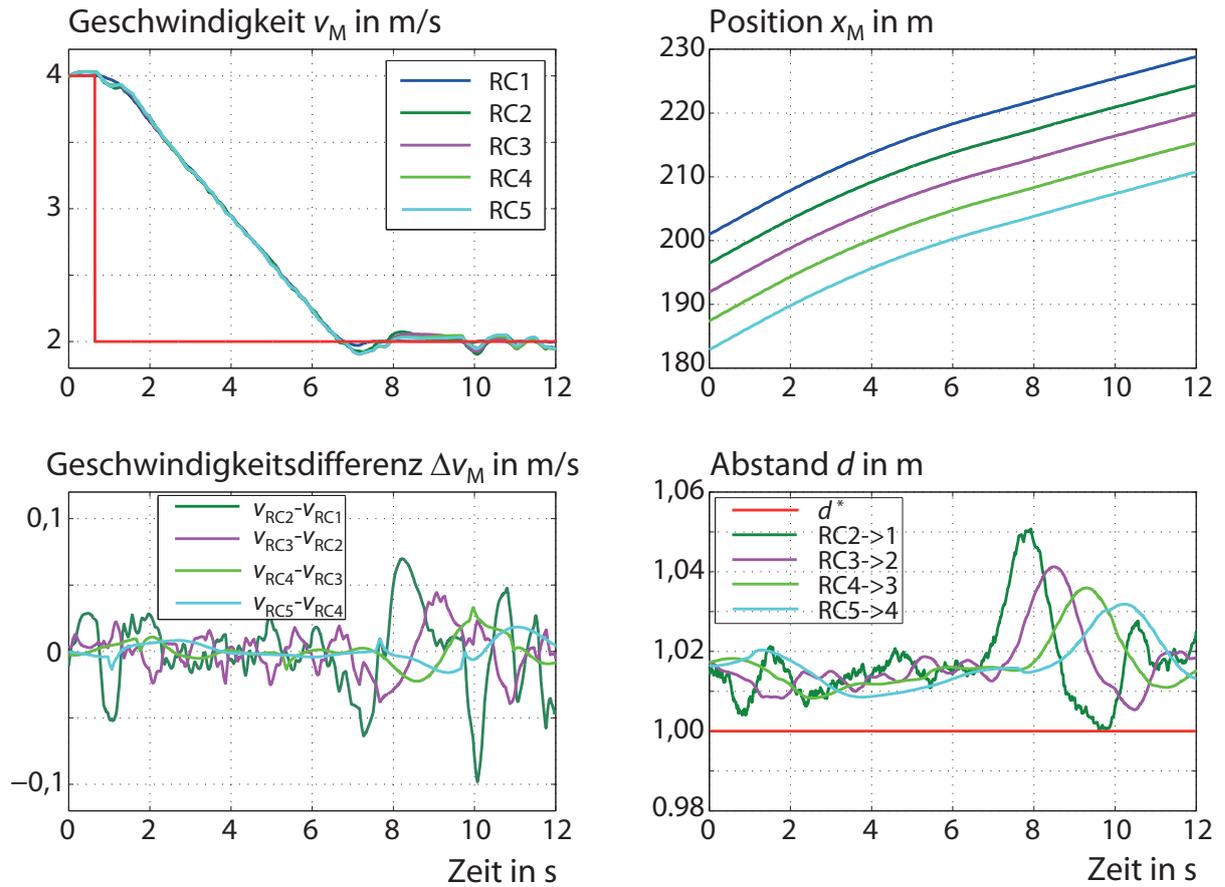
Bild 5.11 zeigt die anschließende Folgefahrt mit einem Sollabstand von 1 m. Der Sollabstand wird mit einer Differenz von wenigen Zentimetern eingeregelt. Durch die in Kap. 5.3.3 beschriebenen Maßnahmen zur Generierung quasi-kontinuierlicher Daten werden die Latenzzeiten der Funkkommunikation fast vollständig kompensiert. Eine geringe Differenz verbleibt dennoch.

Die Resultate der Versuchsfahrten zeigen, dass durch das kontrollierte Annähern der Fahrzeuge eine sichere Konvoibildung erzielt wird. Zudem resultiert aus den Maßnahmen hinsichtlich einer Datenaufbereitung und bei kurzfristigen Funkausfällen eine gute Regelgenauigkeit.



**Bild 5.11 Konvoifolgefahrt der zwei Versuchsfahrzeuge**

In Bild 5.12 ist eine Versuchsfahrt dargestellt, bei der sich ein Fahrzeugverbund, bestehend aus den beiden realen Versuchsfahrzeugen sowie drei simulierten RailCabs, im eingeregelter Zustand mit einem Abstand von einem Meter befindet. Während der Folgefahrt erfolgt ein spontanes Bremsmanöver des Führungsfahrzeugs mit einer Verzögerung von  $0,4 \text{ m/s}^2$ . Trotz der Veränderung der Fahrzeuggeschwindigkeit des Führungsfahrzeugs (RailCab1) verringert sich der Abstand der Folgefahrzeuge nur minimal. Eine Betrachtung der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrzeugen zeigt zudem, dass Kolonnenstabilität vorliegt. Die Auswirkungen des Bremsmanövers verringern sich von den vorderen zu den hinteren Fahrzeugen im Konvoi.



**Bild 5.12** Bremsmanöver eines Konvois bestehend aus fünf Fahrzeugen

## 6. Funktionale Sicherheit autonomer Schienenfahrzeuge

Die Eigenschaften Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit und Sicherheit (RAMS: Reliability, Availability, Maintainability, Safety) müssen insbesondere bei sicherheitsrelevanten Systemen betrachtet werden [DIN01]. Zur Untersuchung der Sicherheitsanforderungen sind daher spezielle Vorgehensweisen entwickelt worden, die unter dem Begriff Systemintegrität beschrieben werden. Das in [Ise08] beschriebene allgemeine Vorgehen beinhaltet hierbei Maßnahmen zur Fehlervermeidung, Fehlerbehebung, Fehlertoleranz, Fehlererkennung und Fehlerdiagnose, zur automatischen Überwachung und zum automatischen Schutz.

Da ein fehlerfreier Betrieb nicht immer vorausgesetzt werden kann, ein sicherer Betrieb jedoch unbedingt erforderlich ist, stellen Fehlerüberwachungs- und Fehlerbehandlungsmethoden integrale Systembestandteile dar. Eine Fehlerbetrachtung ist dabei sowohl für Hardware- als auch für Softwarebestandteile vorzunehmen und wächst prinzipiell mit steigender Systemkomplexität [Bör06].

Um auch bei etwaigen Systemstörungen den Betrieb, wenn auch eingeschränkt, aufrechterhalten zu können, ist bei autonom agierenden Fahrzeugen ein Sicherheitskonzept zwingend erforderlich. Der sichere Betrieb kann beispielsweise durch einen Wechsel in ein Notprogramm gewährleistet werden. Kann ein sicherer Betrieb allerdings nicht weiter garantiert werden, so muss das System gestoppt oder abgeschaltet werden, um einen Gefahrenzustand zu vermeiden. Komplexe Systeme erfordern wiederum gegebenenfalls bestimmte Störfallabläufe, um einen Prozess sicher herunterzufahren.

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen funktionaler Sicherheit in autonomen Systemen erläutert. Anschließend wird eine geeignete Methode zur Zustandsüberwachung in komplexen Systemen vorgestellt, die die Basis für eine Gefahrenanalyse für die autonome Fahrzeugführung und die Konvoibildung der RailCabs bildet. Neben der Fehlerdetektion werden Maßnahmen zur Fehlerbeherrschung dargestellt, die nach Auftreten nicht vermeidbarer Fehler eingeleitet werden. Ferner wird die Integration des erarbeiteten Sicherheitskonzepts in die reale Versuchsumgebung beschrieben. Von besonderer Bedeutung ist auch die Anwendung der Strategien und Störfallroutinen für den sicheren Betrieb insbesondere bei Konvoifahrten.

## 6.1 Sicherheit in elektronisch geregelten, automatisierten Systemen

Die Gesamtsicherheit eines Systems besteht generell aus konstruktiver und hinweisender Sicherheit [DIN01]. Wenn sich durch konstruktive Lösungen potenzielle Gefährdungen nicht gänzlich ausschließen, muss hinweisende Sicherheitstechnik (z.B. in Form von Warntafeln oder Betriebsanleitungen) einbezogen werden. Bei der konstruktiven Sicherheit sollte allerdings von der Verwendung gefährlicher Technologien unmittelbar abgesehen werden. Nicht direkt vermeidbaren Gefahren muss durch mittelbare Schutzeinrichtungen begegnet werden. Weiterer Bestandteil der konstruktiven Sicherheit ist die funktionale Sicherheit, die von der korrekten Funktion eines sicherheitsbezogenen Systems, sicherheitsbezogener Systeme anderer Technologie und externer Einrichtungen zur Risikominderung abhängt [Bör06].

Gemäß DIN EN 61508 ist der sichere Zustand eines technischen Systems als der Zustand definiert, bei dem aufgrund der getroffenen Schutzmaßnahmen gegen mögliche sicherheitsbezogene Fehlfunktionen das Risiko vertretbar gering ist. Dieser sichere Zustand ist stets zu gewährleisten – auch dann, wenn Fehler im System auftreten. Hinsichtlich auftretender Fehler existieren zwei Kategorien [Bör06]:

- Physikalische Fehler treten z.B. durch den Ausfall von Komponenten oder Baugruppen auf.
- Funktionale Fehler entstehen z.B. durch den Ausfall einer Software und führen dazu, dass eine Funktion nicht mehr ausgeführt werden kann.

### 6.1.1 Funktionale Sicherheit

Die funktionale Systemanalyse ist für elektronisch geregelte, autonome Systeme die Basiskomponente zur automatischen, sicheren und zuverlässigen Gefahrenerkennung [Mar04]. Die funktionale Sicherheit beinhaltet die Überwachung von Systemen durch MSR-Sicherheitsfunktionen (Messen, Steuern, Regeln). Dabei müssen sicherheitskritische Fehler frühzeitig erkannt werden, um das System stets in einem sicheren Zustand zu bewahren. Aus der korrekten Funktionalität des MSR-Sicherheitssystems wird mit Hilfe durchführbarer Aktionen der sichere Zustand des Gesamtsystems eingestellt.

Hinsichtlich des Fehlerverhaltens werden folgende Unterscheidungen getroffen [Ise08], [BKL+06]:

- Fail-Operational-Verhalten (Fehleroperativ): Ein Fehler kann toleriert werden, so dass das Teilsystem bzw. die Systemkomponente betriebsfähig bleibt.
- Fail-Safe-Verhalten (Fehlersicher): Tritt ein Fehler auf, so besitzt das Teilsystem bzw. die Systemkomponente direkt einen sicheren Zustand oder es wird durch eine besondere Aktion in einen sicheren Zustand versetzt.
- Fail-Silent-Verhalten (Fehlerpassiv): Nachdem Fehler aufgetreten sind, verhält sich das Teilsystem bzw. die Systemkomponente nach außen hin ruhig. Das Teilsystem bzw. die Systemkomponente wird ausgeschaltet, so dass es keine anderen Systembestandteile in einer falschen Art beeinflussen kann.

Bezüglich eines System- bzw. Komponentenausfalls wird zwischen reparablen und nicht reparablen Systemen unterschieden. Bei letzteren Systemen kann die Funktionsfähigkeit der Systemkomponenten während des Betriebs nicht wiederhergestellt werden [Bör06].

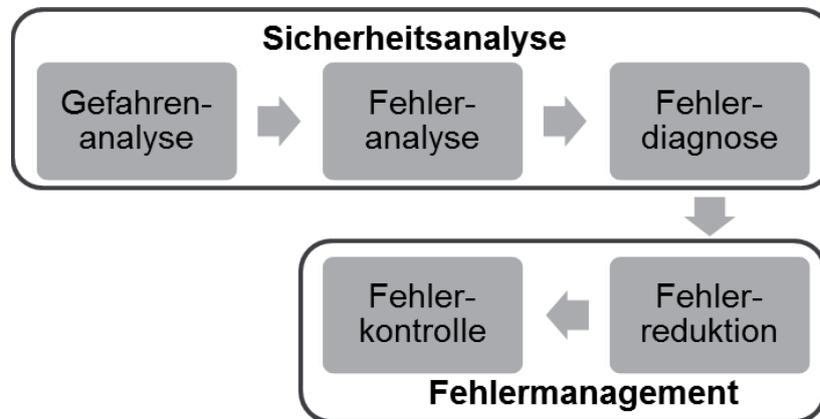
Die funktionale Analyse beginnt mit einer Abschätzung, welche funktionalen Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb eines Systems zu welchen Problemen und Gefahren führen können und ist Bestandteil der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA). Ein Teilgebiet der FMEA ist die System-FMEA, die die Interaktion von Teilsystemen in einem übergeordneten Gesamtsystem oder mit der Umwelt fokussiert. Betrachtet werden sowohl zufällige als auch systematische Fehler [Sta95].

Auf diese Art und Weise abgeschätzte Systemgefahren werden in einer Gefahrenliste aufgeführt. Das Ziel des funktionalen Sicherheitssystems ist es, eine Risikominderung vorzunehmen, so dass das Restrisiko unterhalb der Schwelle zum akzeptablen Risiko liegt [Wer11]. Generell lassen sich folgende Kernpunkte für die funktionale Analyse ableiten:

- Risikoanalyse des Systems und der Komponenten,
- Spezifikation von Sicherheitsanforderungen auf System- und Komponentenebene,
- Sicherheitsgerichtetes System- und Komponentendesign,
- Validierung und Verifikation der Sicherheitsanforderungen.

Bei der Untersuchung zur funktionalen Sicherheit des in dieser Arbeit beschriebenen prototypischen Aufbaus werden schwerpunktmäßig funktionale Systemfehler untersucht, um die Prozesssicherheit dieses elektronisch geregelten, automatisierten Systems zu untersuchen. Die Fehleranalyse erfolgt daher bis hinunter zur Modul- und Baugruppenebene. Eine Detaillierung bis auf Komponenten- und Bauteilebene wird nicht vorgenommen. Die Vorgehensweise ist in Bild 6.1 dargestellt und gliedert sich in eine Sicherheitsanalyse

und ein Fehlermanagement. Nach [Ise07] stellt diese Vorgehensweise einen iterativen Prozess dar.



**Bild 6.1** Sicherheitsanalyse und Fehlermanagement

Die Sicherheitsanalyse des Systems umfasst folgende Aufgaben:

- Gefahrenanalyse: Analyse möglicherweise auftretender Fehlfunktionen und daraus resultierender Gefahren,
- Fehleranalyse: Analyse der Fehlerquellen und möglicher Fehlerketten (z.B. Fehlerbaumanalyse),
- Fehlerdiagnose: Analyse der Möglichkeiten, Fehler erkennen und diagnostizieren zu können.

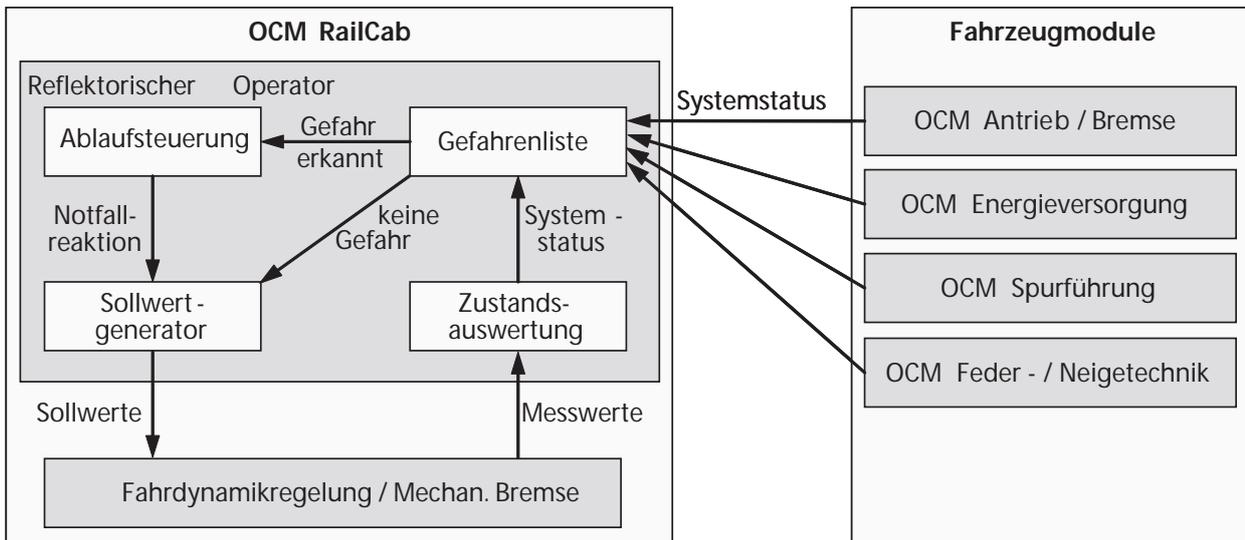
Nach der Analyse potenzieller Gefahren und Fehlerquellen schließt sich das Fehlermanagement an [Lev95]. Dieser zweite Teilbereich geht über die reine Analyse hinaus und beinhaltet folgende Aufgaben:

- Fehlereliminierung oder Fehlerreduktion: Beseitigung der Fehler aus dem System, so dass diese Fehler nicht mehr auftreten können oder keine Auswirkungen auf das Systemverhalten haben.
- Kontrollieren von Fehlern: Systemreaktionen aufgrund detektierter Fehler, so dass das System beispielsweise in einem eingeschränkten Modus weiterarbeiten oder sicher abgeschaltet werden kann.

### 6.1.2 Anwendung der funktionalen Sicherheitsanalyse für die automatische Fahrzeuglängsführung

Die Fehlerbehandlung für die Fahrzeuglängsführung ist im reflektorischen Operator des OCM RailCab abgelegt (vgl. Kap. 2.2.2). Die Unterteilung in den Analyseteil und den Aktionsteil ist in Bild 6.2 zu sehen. Der Analyseteil umfasst die Aufgaben der Zustands-

auswertung des betrachteten Systems und die Auswertung der Gefahrenliste für die jeweilige Funktion. Aufgrund der hierarchischen Systemstruktur wird zunächst jedes Funktionsmodul bzw. jede Funktionsgruppe untersucht. So wird ausgehend von einer Zustandsbeschreibung einzelner Komponenten bzw. Module mittels Gefahrenlisten überprüft, ob ein gefährlicher Zustand vorliegt. Im Aktionsteil werden entsprechende Notfallreaktionen generiert. Dies erfolgt im Wesentlichen durch eine Ablaufsteuerung, die Befehle an den Sollwertgenerator weitergibt. Im Fehlerfall reagiert der Sollwertgenerator dann mit einer Anpassung zukünftiger Stellbefehle. Um die Gefahrenanalyse für einen Fahrzeugverbund vornehmen zu können, ist es zunächst erforderlich, das einzelne Fahrzeug zu untersuchen [LG00]. Anschließend werden die Auswirkungen der auf den Fahrzeugen auftretenden Fehler hinsichtlich ihrer Wechselwirkung auf ein anderes Fahrzeug analysiert.



**Bild 6.2 Fehlerbehandlung für die Fahrdynamikregelung im OCM RailCab**

Zudem werden für jedes Fahrzeug dezentrale und zentrale Sicherheitsfunktionen vorgesehen. Die den jeweiligen Funktionsmodulen zugeordneten Sicherheitsfunktionen können dezentral innerhalb des jeweiligen Moduls ausgeführt werden. Übergeordnete Funktionen, wie sie beispielsweise in die Regelung der Fahrdynamik einbezogen werden, werden zentral im OCM RailCab angeordnet. So ergibt sich eine übersichtliche Struktur, bei der lediglich wirklich benötigte Informationen an zentraler Stelle zusammenlaufen. Dies verringert den Informationsfluss und sorgt vor allem dafür, dass die zentrale Fehlerverwaltung sowie das Fehlermanagement übersichtlich bleiben.

## 6.2 Sicherheitsanalyse

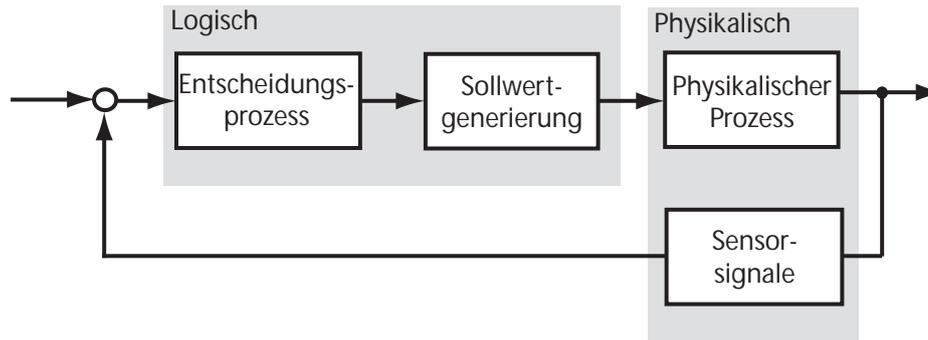
### 6.2.1 Gefahrenanalyse

Ziel der Gefahrenanalyse ist es, das System auf potenzielle Gefahren zu untersuchen. Dabei muss das System ganzheitlich untersucht werden, damit durch den Gesamtüberblick Gefahren und deren Ursachen erkannt werden können. In einem weiteren Schritt wird versucht, Gefahren zu reduzieren – oder wenn möglich, sie ganz auszuschließen. Die Sicherheitsanalyse, beginnend mit einer Analyse eventueller Gefahren, die von Fehlerzuständen einzelner Module hervorgerufen werden können, wird als Vorwärtssuche bezeichnet [Bör06].

Der Begriff Gefahr beschreibt eine physikalische Situation, die potenziell einen Schaden für einen Menschen oder einen Gegenstand beinhaltet. Ein Schaden kann nur dann entstehen, wenn zuvor ein gefährlicher Zustand vorlag. Jedoch muss ein gefährlicher Zustand nicht zwangsläufig zu einem Schaden führen, da sich je nach Zustandsübergang auch ein sicherer Zustand herbeiführen lässt [DIN01]. Für den Zustandsübergang besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen Zustand und auftretenden Ereignissen. Die Abhängigkeit von Vorbedingung und auftretenden Ereignissen ermöglicht somit das Aufstellen einer Gefahrenliste, die zur Gefahrenerkennung eingesetzt wird.

Um eine solche Gefahrenliste erstellen zu können, bedarf es Systemwissen während einer Struktur- und Funktionsanalyse. Abweichend von dem im Eisenbahnwesen weit verbreiteten Ansatz, das Gesamtsystem auf der Komponentenebene zu beschreiben, wird hier der Ansatz verfolgt, die Funktionsebene zu analysieren [DM05]. Es wird zwar für jede Funktionsgruppe eine Analyse durchgeführt, aber es werden nur die benötigten Parameter an übergeordnete Funktionen weitergegeben. So kann trotz der Komplexität des Gesamtsystems eine Übersichtlichkeit gewahrt werden.

Um die Gefahrenanalyse übersichtlicher zu gestalten, wird das Modul zunächst in zwei Ebenen differenziert. Dabei entspricht die physikalische Ebene, die sich aus der physikalischen Ausführung des Prozesses und der Diagnoserückführung zusammensetzt, der Controller-Ebene des OCM. Zudem existiert eine logische Ebene, entsprechend dem reflektorischen Operator, bestehend aus dem Entscheidungsprozess und der Sollwertanpassung. Gemäß Bild 6.3 ergibt sich ein Funktionsregelkreis, der für jedes MFM wie auch für jedes AMS und VMS aufgebaut und untersucht wird.



**Bild 6.3 Funktionsregelkreisstruktur**

Die Diagnoserückführung beinhaltet nicht nur physikalisch messbare Systemgrößen (Sensorsignale), sondern auch logische Systemzustände. Im physikalischen Prozess werden die Stellbefehle umgesetzt, während im logischen Prozess die Ist-Zustände des Systems mit den Soll-Systemzuständen in Beziehung gesetzt werden. Hierbei müssen insbesondere die geltenden Sicherheitsvorschriften und -vorgaben beachtet werden.

Diese Funktionsregelkreisstruktur bietet den Vorteil, dass insbesondere bei komplexen Systemen, die auch situationsbedingte Anpassungen oder Optimierungen enthalten, der logische Prozess, also der reflektorische Operator, getrennt untersucht wird. Die Auswirkungen, die sich von diesem Block auf andere Systemkomponenten ergeben, können dann gezielt unterbunden werden. Ausgehend von dieser Struktur werden die in dem jeweiligen Modul enthaltenen Komponenten bzw. Funktionen tabellarisch aufgelistet und mögliche Fehler sowie die dazugehörigen Unfallmöglichkeiten charakterisiert.

Um mögliche Gefahren die Fahrzeuglängsregelung untersuchen zu können, sind zunächst Gefahrenanalysen der unterlagerten und beeinflussenden Module oder Funktionsgruppen vorzunehmen. Ist die Funktion des Antriebs- und Bremsmoduls nicht gegeben, so ist offensichtlich, dass aufgrund falsch eingestellter bzw. nicht vorhandener Schubkräfte die Sollwerte der Längsdynamikregelung nicht erreicht werden können. Potenzielle Gefahren sind eine Entgleisung, eine Kollision mit weiteren Fahrzeugen bzw. eine thermische Zerstörung von Stromrichter oder Motor durch eine Überbelastung. Bei den weiteren Modulen (Spurführungsmodul, Feder-/ Neigetechnikmodul und Energieversorgungsmodul) wird lediglich geprüft, ob diese Module den Fahrbetrieb gegebenenfalls einschränken oder verhindern. So wird für diese Module lediglich ermittelt, ob ein Teil- oder Gesamtausfall vorliegt. In Rahmen dieser Arbeit erfolgt daher ausschließlich eine Untersuchung des OCM RailCab. Die ermittelte Gefahrenliste für das OCM RailCab ist Tabelle 6.1 zu entnehmen.

**Tabelle 6.1 Gefahrenliste und resultierende Unfallmöglichkeiten im OCM RailCab für die Konvoifahrt (Ausschnitt)**

Prozess	Ursache	Gefahr
<b>Signal- erfassung</b>	Fehlererfassung Antriebs-/Bremsmodul	Entgleisung, Kollision
	Fehlererfassung Energieversorgungsmodul	Entgleisung, Kollision
	Fehlererfassung Spurführungsmodul	Entgleisung
	Fehlererfassung Federneigetechnikmodul	Entgleisung,
	Fehler Positionserfassungssystem	Entgleisung, Kollision
	Fehler Umfeldsensorik	Kollision
	Fehler Stellungssignal mechanische Bremse	Entgleisung, Kollision
	Fehlererfassung Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation	Kollision
<b>Physikalischer Prozess</b>	fehlerhafte Abstandsregelung	Kollision
	gestörte kontinuierliche Funkkommunikation Fahrzeug-Fahrzeug	Kollision
	gestörte nachrichtenbasierte Funkkommunikation Fahrzeug-Fahrzeug	Kollision
<b>Sollwert- generierung</b>	Berechnung Istabstand	Kollision
	Berechnung Sollabstand	Kollision
	Berechnung Maximalgeschwindigkeit	Entgleisung, Kollision
	Bestimmung Konvoimodus	Kollision
	Berechnung Sollwerte für Konvoikoordination	Kollision
<b>Entscheidungs- prozess</b>	Auswahl Betriebsmodus	Kollision
	Auswahl Störfallreaktion	Entgleisung, Kollision

Da im OCM RailCab einige logische Funktionen implementiert sind, bestehen in den Bereichen Sollwertgenerierung sowie Entscheidungsprozess zahlreiche Fehlermöglichkeiten. Bei Modulen mit umfangreichen Abläufen im reflektorischen oder kognitiven Operator muss daher vor allem für die logische Ebene eine umfangreiche Gefahrenanalyse betrieben werden. Resultat der Gefahrenanalyse ist eine Übersicht über potenzielle Fehlerquellen und korrespondierende Gefährdungen gemäß Tabelle 6.1.

## 6.2.2 Fehlerbaumanalyse

An die Gefahrenanalyse schließt sich die Fehleranalyse an. Neben dem Auftreten einzelner Fehler müssen insbesondere die Auswirkungen bei gleichzeitigem Einwirken mehrerer Fehler untersucht werden. Um Fehlerkombinationen in komplexen Systemen auswerten zu können, werden Fehlerausbreitungsmodelle angewendet. Dazu geeignet ist die Fehlerbaumanalyse als ein deduktives Verfahren, bei dem von einem unerwünschten Ereignis ausgegangen wird und anschließend nach allen Ursachen gesucht wird. Diese Vorgehensweise wird auch als Top-Down- oder Rückwärts-Analyse bezeichnet. Ziel ist es hierbei logische Verknüpfungen zwischen Komponenten- oder Teilsystemausfällen zu ermitteln. In dieser Arbeit werden alle Ausfallkombinationen von unerwünschten Ereignissen erörtert [DIN09], [Bör06].

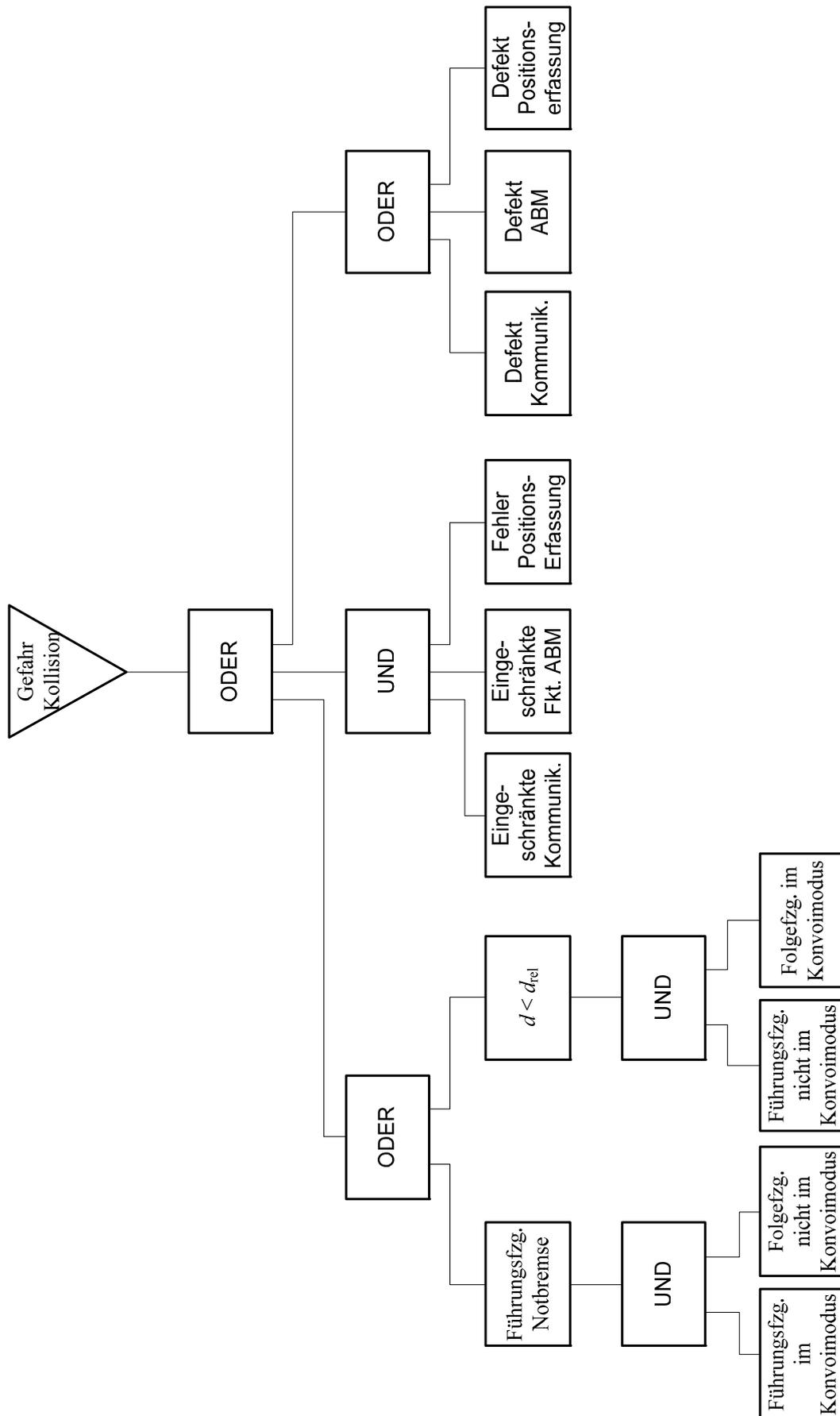
Der in Bild 6.4 dargestellte Fehlerbaum zeigt die Zweige, die nach oben hin zur Gefahr Kollision führen. Eine Unterscheidung in schwere und leichtere Fehler erhöht zudem die Übersichtlichkeit des Fehlerbaums und erleichtert seine Auswertung.

Der Fehlerbaum zeigt mögliche Fehlerverkettungen, die zu dem betrachteten Ereignis hinführen. Die angegebenen Systemfehler können aber unterschiedlicher Art sein. So resultieren gewisse Systemfehler aus fehlerhaften Berechnungen für Sollvorgaben, andere aus unerlaubten Transitionen innerhalb von Zustandsmodellen. Derartige Fehlerquellen können gegebenenfalls schon während der Designphase eines Systems eliminiert, also ausgeschlossen werden.

## 6.2.3 Zustandsbestimmung im OCM RailCab

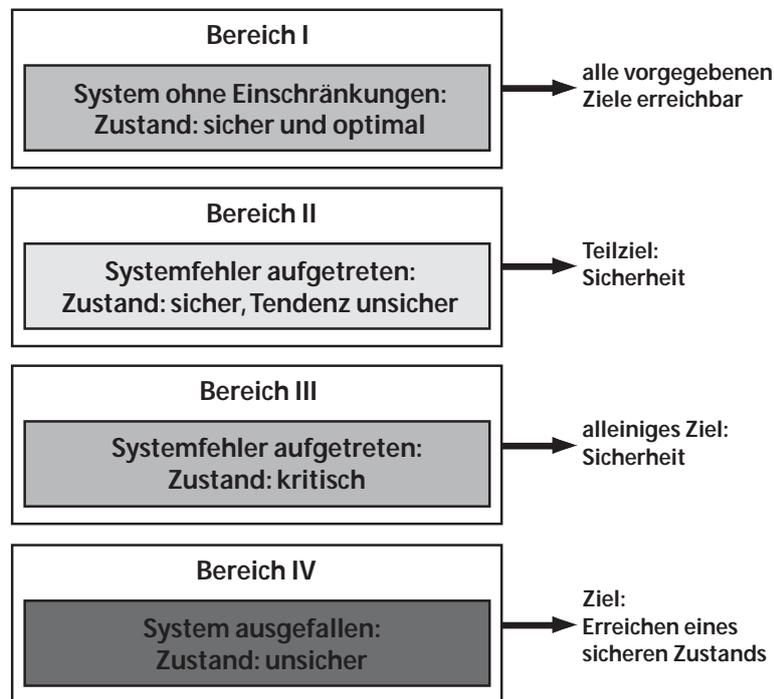
Die Bestimmung des Systemzustands erfolgt hier mit Hilfe eines Zustandsautomaten und eines booleschen Modells. Ausgehend vom Ausfallverhalten einzelner Komponenten wird ein Modell für das Systemausfallverhalten erstellt. Zur Beschreibung sowohl auf der Komponenten- als auch auf der Systemebene werden folgende Zustände definiert [FGM+07]:

- I Zustand ist sicher und optimal
- II Zustand ist sicher mit der Tendenz zu unsicher
- III Zustand ist kritisch
- IV Zustand ist unsicher



**Bild 6.4 Fehlerbaum des Folgefahrzeugs für die Gefahr Kollision (Ausschnitt)**

Bild 6.5 zeigt eine Übersicht über die vier definierten Sicherheitsbereiche, die für alle Komponenten, Funktionsgruppen und Funktionsmodule gelten [FGM+07].



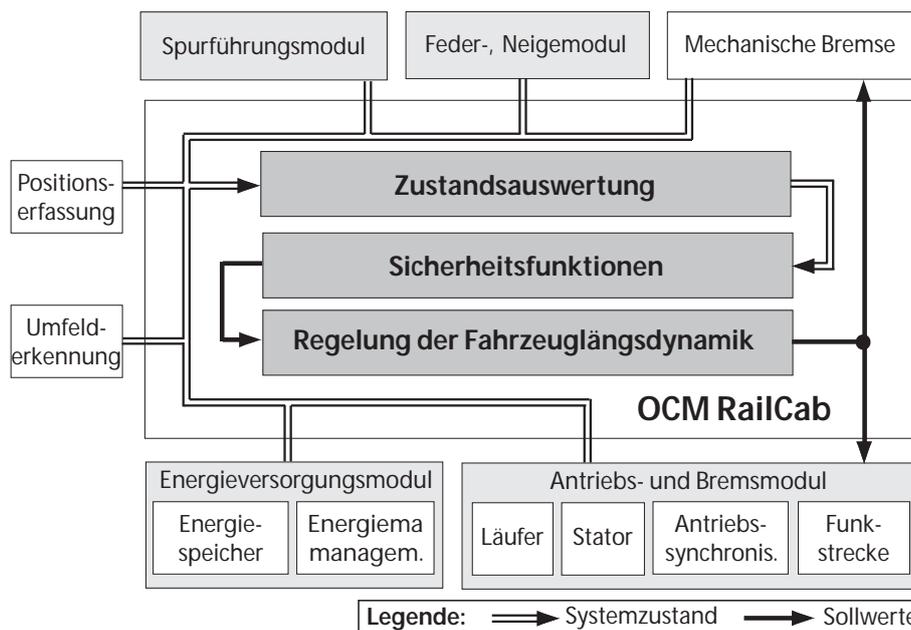
**Bild 6.5** Kategorien des Systemzustands

Jeder Bereich ist gekennzeichnet durch seinen Zustand und die dazugehörigen Ziele. In Bereich I ist das System sicher und optimal. Es können z.B. alle Ziele der Selbstoptimierung erreicht werden. Bereich II besagt, dass das System sicher ist, aber tendenziell zur Unsicherheit neigt. Sicherheit wird daher zum Teilziel. In Bereich III liegt ein unsicherer Zustand vor und Sicherheit wird alleiniges Ziel. Werden entsprechende Maßnahmen ergriffen, kann das System weiter betrieben werden (Fail-Safe-, Fail-Silent-Verhalten). Befindet sich das System in Stufe IV, so ist dies nicht mehr gegeben. Hier herrscht potenzielle Unfallgefahr und das System muss daher zwingend abgeschaltet werden. Für das Verhalten des Gesamtsystems muss folglich entschieden werden, ob der Ausfall einer Teilfunktion toleriert werden kann oder nicht. Wie zuvor beschrieben, wird diese Überprüfung entsprechend der hierarchischen Systemstrukturierung vorgenommen.

Zur Zustandsbestimmung für die Regelung der Fahrzeuglängsdynamik wird ein Modell nach Bild 6.6 erstellt. Aus den Funktionsgruppen Energiespeicher und Energiemanagement setzt sich das MFM Energieversorgung zusammen. Läufer, Stator, Antriebssynchronisierung und Funkkommunikation zur Strecke ergeben zusammen das MFM Antrieb und Bremse. Zusammen mit den zwei Funktionsmodulen Spurführung und Feder-

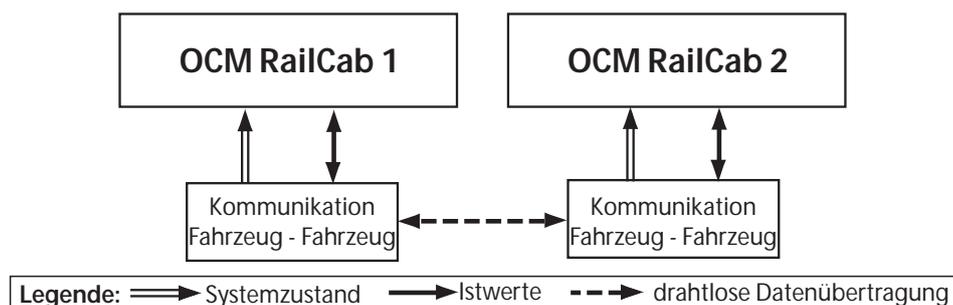
Neigetechnik sowie der Funktionsgruppe Mechanische Bremse ergibt sich das gesamte AMS Fahrzeug.

Der ermittelte Systemzustand wird, wie in Bild 6.6 dargestellt, an den Block Sicherheitsfunktionen übergeben, wo die Gefahrenanalyse stattfindet. Von dort aus werden Sollwerte an die Regelung übergeben. Da die Regelung der Fahrzeuglängsdynamik nur durch das Antriebs- und Bremsmodul sowie durch die mechanische Bremse beeinflusst werden kann, werden die Sollwerte auch nur dorthin übergeben.



**Bild 6.6** Blockdiagramm zum Informationsfluss für die Fahrzeuglängsregelung

Im Konvoibetrieb erweitert sich das zu betrachtende System zu einem VMS bestehend aus den zuvor dargestellten AMS der einzelnen beteiligten Fahrzeuge. Im Konvoibetrieb bildet das Zustandsmodell für die Fahrzeuglängsregelung die Grundlage. Elementarer Bestandteil des Konvoibetriebs ist die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation, die daher zwingend mit einbezogen werden muss. Somit ergibt sich der Aufbau nach Bild 6.7. Die Sicherheitsanalyse ist außerdem auf die Abstandsregelung anzuwenden.



**Bild 6.7** Übersicht des Informationsflusses im Konvoibetrieb

## 6.2.4 Fehlerdiagnose

### Plausibilisierung von Nutzsignalen

Sämtliche Nutzsignale werden eingangsseitig auf Fehler geprüft. Dies geschieht mittels einer Bereichs- und Gradientenprüfung. Diese Überprüfung wird bei Sensorsignalen eingesetzt und ist insbesondere bei drahtlos übertragenen Daten von besonderer Bedeutung, da hier mit einer erhöhten Übertragungsfehlerrate zu rechnen ist. Die Signalflusskette zur Plausibilitätsprüfung der Inkrementalgeber ist in Bild 6.8 dargestellt. Dazu wird die inkrementelle Wegänderung in eine Geschwindigkeit umgerechnet und einer Wertebereichsprüfung unterzogen. Anschließend findet eine weitere logische Prüfung statt. Dort wird überprüft, ob die mechanische Bremse arretiert ist und sich das Fahrzeug daher nicht bewegen darf.

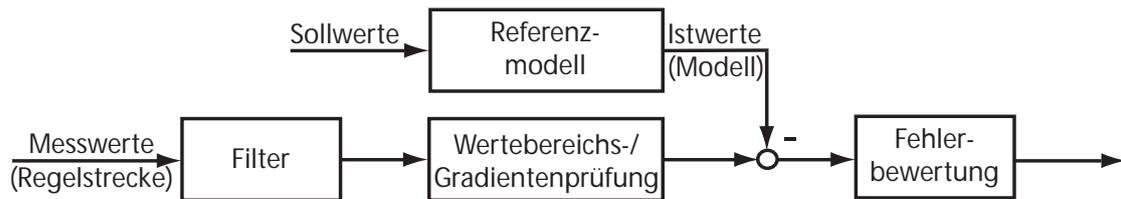


**Bild 6.8** Verifikation von Sensorsignalen

Sind mehrere redundante Sensoren vorhanden, können die Messwerte miteinander verglichen werden und aus Abweichungen zwischen den einzelnen Signalen können Fehlfunktionen festgestellt werden. Dieses Verfahren wird auch bezüglich der Auswertung der Positionsgeber angewendet. Da pro Rad ein Inkrementalgeber zur Verfügung steht, können die Messwerte auf Konsistenz überprüft werden.

### Modellbasierte Überwachungsfunktion

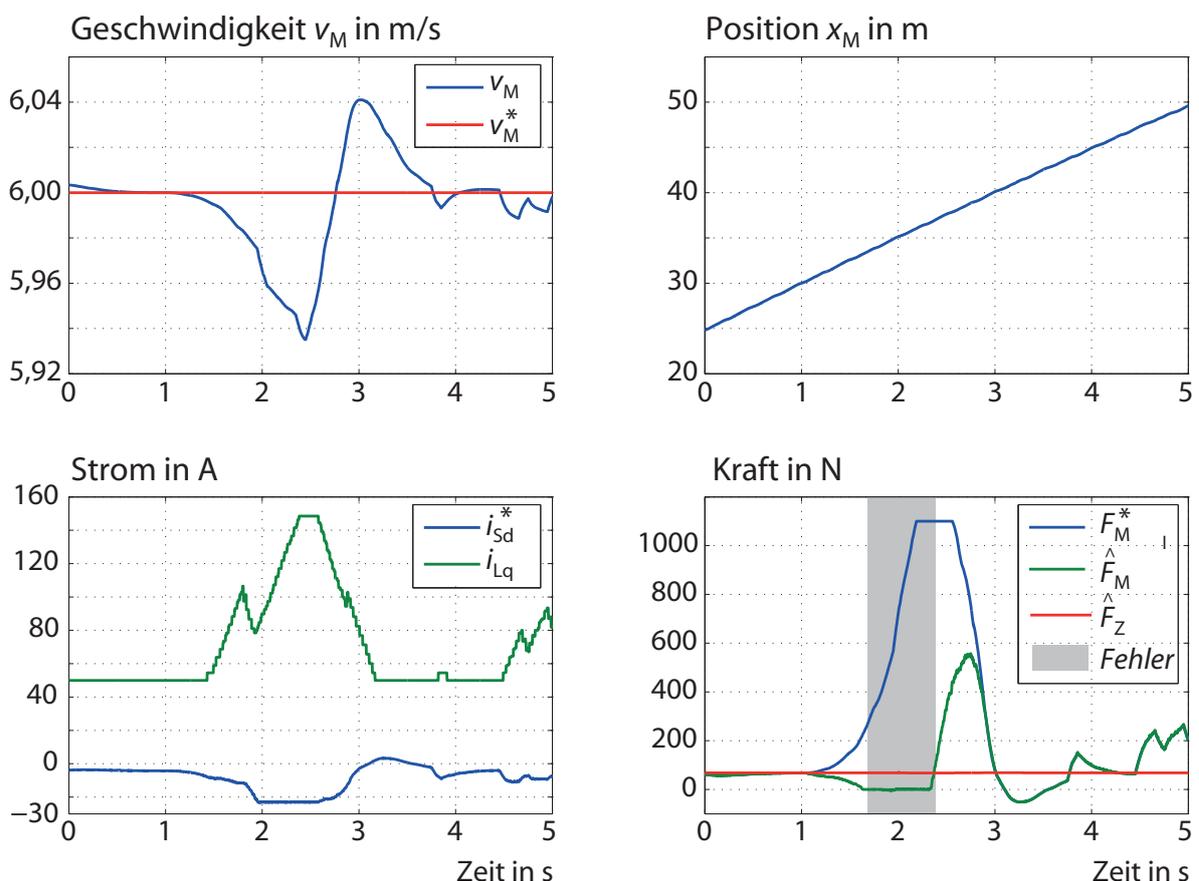
Um die Funktionalität des Antriebs-, Bremsmoduls zu überwachen, ist es nicht ausreichend nur die zur Verfügung stehenden Sensorsignale auszuwerten. Da es sich um ein örtlich verteiltes System handelt, kann zwar die Funktion des Läufers überprüft werden, aber nicht genau abgeschätzt werden, ob der Stator seine Funktion erfüllt und ob die Wechselwirkung zwischen beiden Motorkomponenten gegeben ist. Daher wird eine modellbasierte Überwachungsfunktion eingesetzt. Parallel zur realen Regelstrecke wird dabei ein validiertes Referenzmodell eingesetzt, auf das ebenfalls die Stellgrößen des Reglers aufgeschaltet werden (siehe Bild 6.9). Die Ausgänge beider Systeme werden dann verglichen, um die Differenz aus gemessenen und errechneten Größen zu ermitteln. Bei nicht tolerierbaren Abweichungen greifen dann Störfallroutinen ein. Mit dieser Methode lassen sich zufällige Fehler zuverlässig aufdecken [RKR05], [SI02].



**Bild 6.9 Modellbasierte Fehlererkennung**

Treten größere Abweichungen zwischen Modell und Realität auf, so deutet dies auf Fehlfunktionen oder Komponenten- bzw. Baugruppenausfälle hin.

Bild 6.10 zeigt ein Fahrmanöver bei dem der Ausfall eines Statorsegments auftritt. Dies hat zur Folge, dass die Geschwindigkeit  $v_M$  aufgrund der einwirkenden Fahrwiderstandskräfte (Reibung, Luftwiderstand etc.) absinkt, während der Sollwert der Schubkraft  $F_M^*$  und ebenso der Läuferstrom  $i_{Lq}$  sowie der Sollwert des Statorstroms  $i_{sd}^*$  bis zu den Maximalwerten ansteigen.



**Bild 6.10 Modellbasierte Fehlererkennung – Segmentausfall des Linearantriebs**

Anhand einer modellbasierten Schätzung der Störkräfte  $\hat{F}_Z$  und der modellbasierten Schätzung der wirksamen Motorkraft  $\hat{F}_M$  muss ein Fehlerfall vorliegen. Da der Läuferstrom gemessen wird, ein Istwert des Statorstroms jedoch nicht zur Verfügung steht, wird

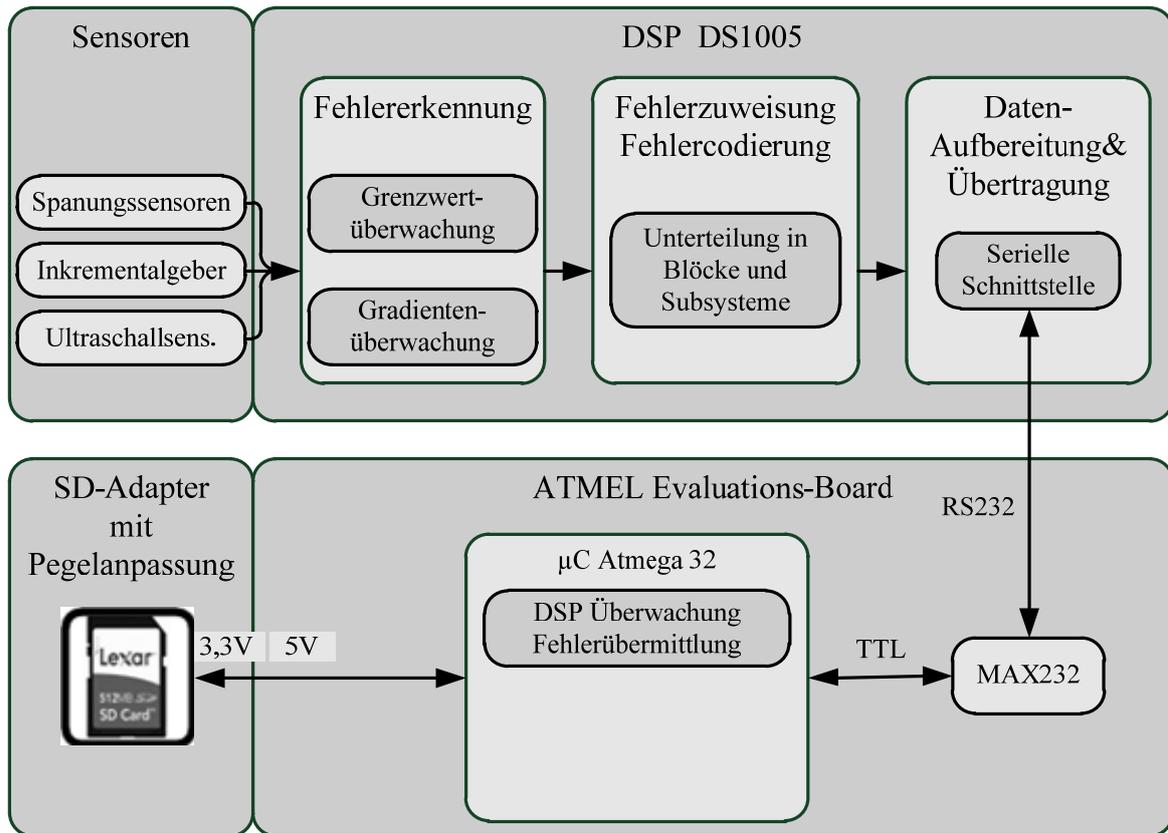
folglich auf den Ausfall eines Statorsegments geschlossen. In Bild 6.10 ist der Bereich, in dem im reflektorischen Operator ein Fehler gemeldet wird, grau gekennzeichnet. Als Resultat wird der Fehler Statorausfall mit der entsprechenden Position  $x_M$  (hier: ca. 33 m) und der Fahrgeschwindigkeit  $v_M$  festgehalten.

### 6.2.5 Fehlerüberwachung und Fehlerspeicherung

Um Fehlerereignisse auswerten zu können, sind neben der Störfallbeherrschung ein Fehlerüberwachungssystem sowie eine Speicherung von aufgetretenen Fehlern von großer Bedeutung. Im Fehlerfall wird wie zuvor beschrieben eine Fehlerreaktion ausgeführt, um einen sicheren Zustand beizubehalten oder eine Notfallreaktion einzuleiten. Diesbezüglich ist weniger die Herkunft des Fehlers relevant als die mögliche Gefahrensituation. Ein Beheben des aufgetretenen Fehlers und eventuelle Veränderungen oder Verbesserungen am System setzen jedoch voraus, dass die Fehlerursache lokalisiert bzw. aufgetretene Fehlerverkettungen exakt analysiert werden können, was mit Hilfe eines geeigneten Fehlerüberwachungssystem realisiert werden kann. Das Überwachungssystem beinhaltet folgende Funktionen und Komponenten:

- Fehlerbaum der jeweiligen Funktion bis hinunter zur Komponentenebene,
- Fehlerzuweisung und Fehlercodierung,
- Datenaufbereitung und Übertragung,
- Datenspeicherung.

Der Einsatz eines externen Speichersystems bietet zudem den Vorteil, dass auch bei einem Ausfall des zentralen Fahrzeugrechners kein Datenverlust entsteht und zudem noch der zentrale Fahrzeugrechner kontinuierlich auf einen Ausfall überprüft werden kann. Der Aufbau des externen Fehlerüberwachungssystems ist in Bild 6.11 illustriert. Die Fehlerdaten werden vom PowerPC (DSP DS1005) des zentralen Fahrzeugrechners an einen Mikrocontroller (Atmega32) übertragen und anschließend nichtflüchtig gespeichert (SD-Karte).

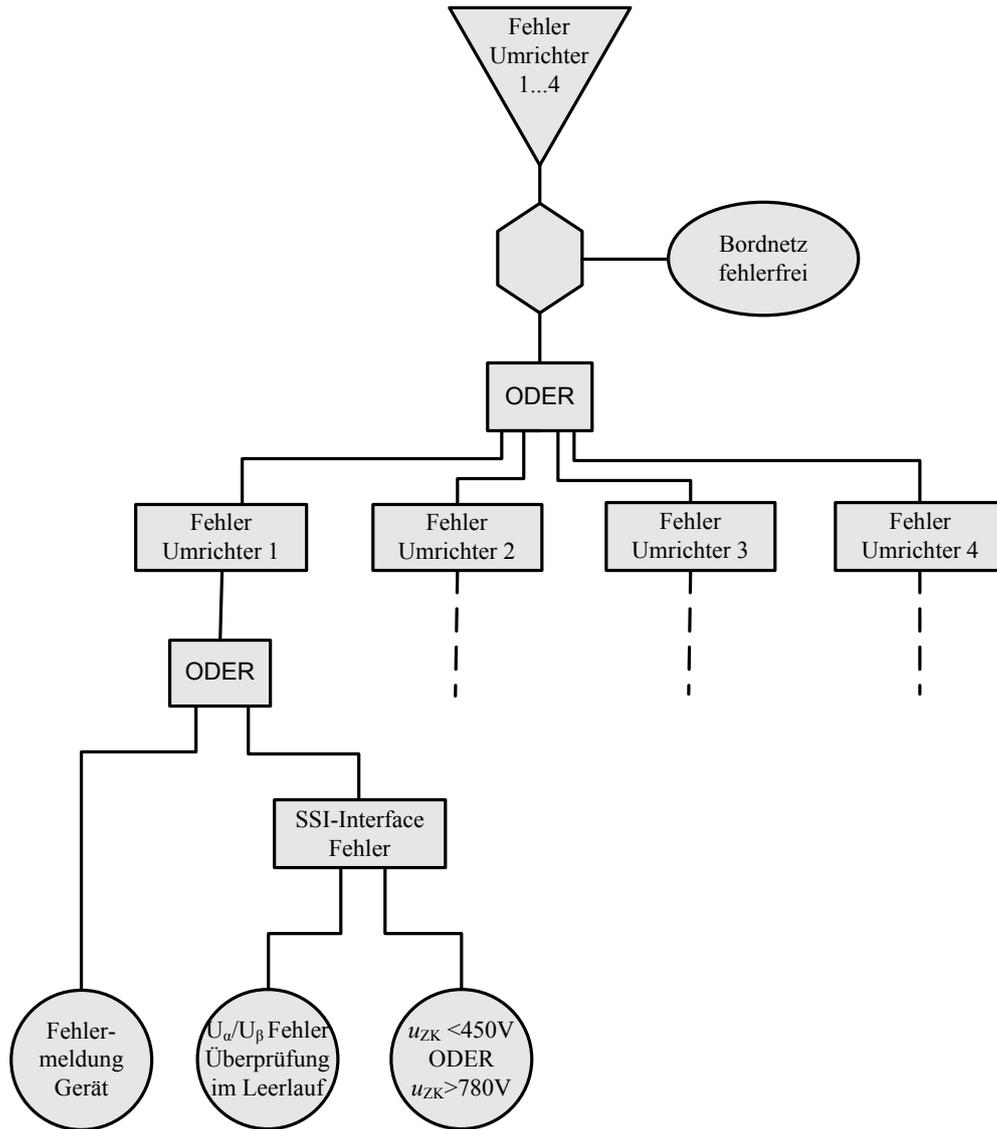


**Bild 6.11** Aufbau Fehlerüberwachungssystem

## Fehlerbaum

Mit dem Fehlerüberwachungssystem kann eine Detaillierung bis hinunter zur untersten Systemebene (z.B. Komponentenebene) vorgenommen werden, um Fehlerquellen exakt zu lokalisieren. Dazu wird eine Fehlerbaumanalyse durchgeführt, die wiederum als Strukturierungsmethode eingesetzt wird.

In Bild 6.12 ist exemplarisch der Fehlerbaum für die vier Läuferumrichter dargestellt. Als mögliche Fehler sind entweder Fehlermeldungen zu sehen, die direkt vom Gerät gemeldet werden oder aber auch Fehler, die auf die SSI-Schnittstelle, die zum Austausch von Soll- und Istgrößen zwischen Stromregler (implementiert auf dem PowerPC Master) und Umrichter eingesetzt wird, zurückzuführen sind. Im oberen Teil des Fehlerbaums stellt eine bedingte Verknüpfung die Verbindung zum Bordnetz her. Fehlermeldungen der Läuferumrichter dürfen nur dann gemeldet werden, wenn das Bordnetz fehlerfrei arbeitet.



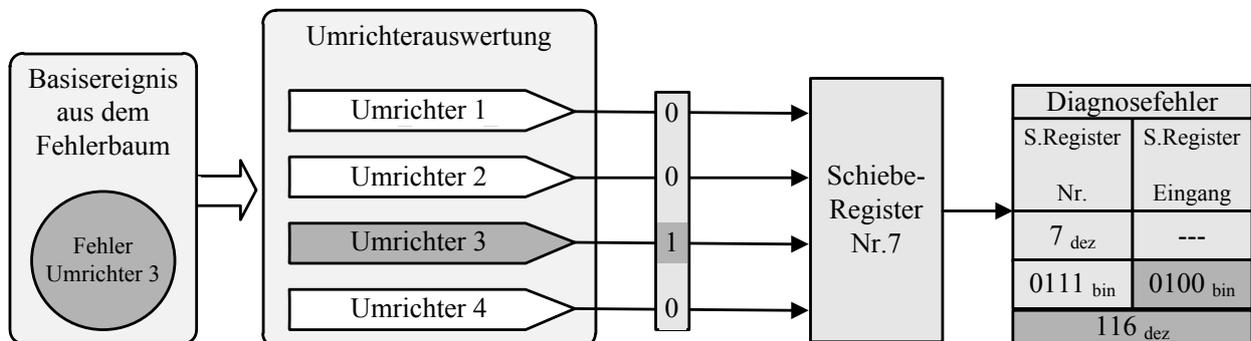
**Bild 6.12 Fehlerbaum für Läuferumrichter (Ausschnitt)**

**Fehlerzuweisung und Codierung**

Aus der Darstellung des Fehlerbaums wird ein Diagnosefehler generiert, der eine eindeutige Zuordnung zwischen den ereigneten und den gespeicherten Fehlern ermöglicht. Die Fehlercodierung beinhaltet den genauen Ort des Fehlers und basiert auf einer funktions- und modulorientierten Zuordnung. Hierbei muss beachtet werden, dass auch mehrere gleichzeitig auftretende Fehler zusammen erfasst werden können.

Bild 6.13 zeigt ein Beispiel für die Fehlercodierung. Aus einem Basisereignis des Fehlerbaums – Läuferumrichter 3 ist fehlerhaft – wird für die Gruppe Läuferumrichter ein Diagnosefehler erzeugt. Das Fehlerwort beinhaltet die Information über die Gruppe (hier:

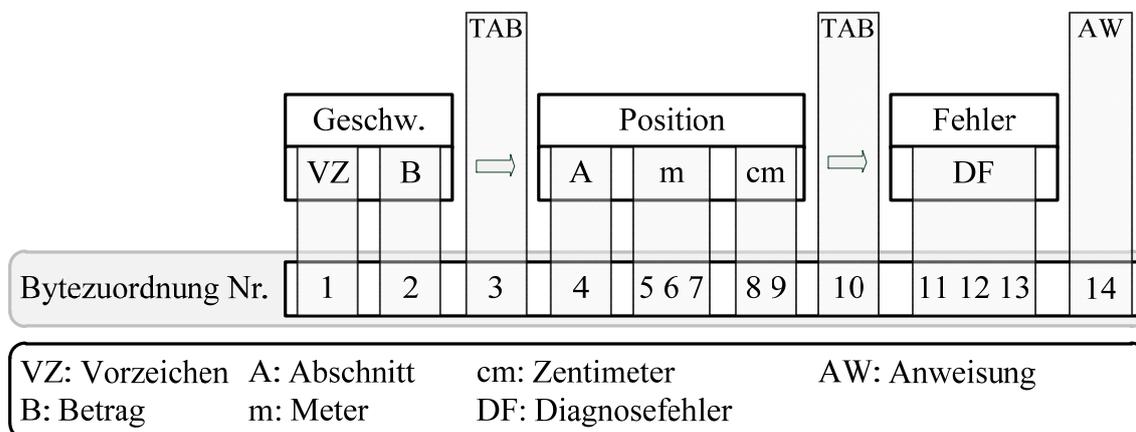
Fehler der Läuferumrichter wird geschrieben in Schieberegister Nr. 7 – 0111) und den Fehler (0100).



**Bild 6.13 Fehlercodierung am Beispiel der Läuferumrichter**

## Datenaufbereitung, Übertragung und Speicherung

Nachdem ein Fehler detektiert worden ist, muss der Fehler auch abgespeichert werden, um Fehlerquellen lokalisieren und analysieren zu können. Aus diesem Grund findet zunächst eine Codierung des Fehlers statt. Der Code wird ergänzt durch eine Geschwindigkeits- und Positionsangabe. Das hier entwickelte Datentelegramm schließt ab mit einer Anweisung, die den Speichervorgang auf dem externen Medium anregt (siehe Bild 6.14).



**Bild 6.14 Datentelegramm zur Fehlerspeicherung**

Das zusammengestellte Datentelegramm wird anschließend zur Speicherung über eine serielle Schnittstelle übertragen. Die Verarbeitung des Datentelegramms geschieht auf einem Mikrocontroller (Atmega32). Dort wird zyklisch ein Speichervorgang auf einer externen SD-Speicherkarte angeregt [Gor09]. Der Datentransfer über die serielle Schnittstelle wird kontinuierlich alle 15ms ausgeführt, unabhängig davon ob ein Fehler gemeldet werden muss. Durch die kontinuierliche Abfrage dieser Schnittstelle durch den Mikrocontroller kann der Fahrzeugrechner zusätzlich auf einen Programmabbruch überprüft

werden. Bleibt das Signal vom Fahrzeugrechner über mehrere Zyklen aus, so wird am Mikrocontroller ein Ausgang gesetzt, mit dem z.B. das Ventil der mechanischen Fahrzeugbremse direkt angesteuert werden kann.

## 6.3 Fehlermanagement

An die Sicherheitsanalyse, durch die Fehlerquellen und mögliche Gefahren ermittelt werden, muss sich das Fehlermanagement anschließen. Es existieren generell drei Möglichkeiten für den Umgang mit resultierenden Gefährdungen: Gefahrenzustände können entweder eliminiert, reduziert – oder wenn dies nicht möglich ist – kontrolliert werden [Lev95]. Eine Gefährdung wird eliminiert durch Beseitigung des gefährdenden Zustands aus dem System. Eine Fehlerreduktion liegt vor, wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit des Fehlers gemindert wird, indem die Bedingungen, die zu dieser Gefährdung führen, reduziert werden.

Für alle Gefährdungen müssen Maßnahmen zur Fehlerbeherrschung ergriffen werden. Die Wahrscheinlichkeit, die zu einem Unfall führt, kann durch eine zuverlässige Fehlerdetektion reduziert werden. So wird das System bei einem erkannten Fehler in einen sicheren Zustand überführt.

### 6.3.1 Fehlereliminierung und Fehlerreduktion

Die effektivste Methode ist eine Eliminierung von Fehlern bereits in der Phase des Systemdesigns. Dabei wird insbesondere bei der Entwicklung von Software darauf geachtet, dass diese fehlerfrei arbeitet. Allerdings sind zur Verifikation formale Methoden einzusetzen [GBS+04], [GTB+03].

Mit Hilfe dieser modellbasierten Verifikationsansätze kann nachgewiesen werden, dass bestimmte Zustände nicht erreicht werden können. Dies betrifft vor allem Fehler, die in der logischen Systemebene entstehen können. Entsprechend des Fehlerbaums (vgl. Bild 6.6) liegt eine Gefährdung z.B. dann vor, wenn sich das Führungsfahrzeug im Zustand NOCONVOY und das Folgefahrzeug im Zustand CONVOY befinden. Während der Entwurfsphase des Echtzeit-Koordinationsmusters kann nachgewiesen werden, dass dieser Zustand unerreichbar ist und daher nicht mehr betrachtet werden muss. Generell entstehen daher im Bereich der Konvoikoordination keine fehlerhaften Zustandskombinationen [HTS08b]. Auf diese Weise lässt sich der Fehlerbaum aus Bild 6.6 um einzelne Zweige reduzieren.

### 6.3.2 Fehlerbeherrschung

Bezüglich der physikalischen Prozesse lassen sich Fehler in der Messdatenerfassung (z.B. durch Sensorfehler) oder Fehler in der Aktorik (z.B. durch Störeinflüsse oder Verschleiß) nie gänzlich ausschließen. Daher verbleiben Fehlerquellen im System, die potenziell zu Gefährdungen führen können.

Diese potenziellen Fehlerquellen müssen sicher detektiert werden, so dass nach einem aufgetretenen und erkannten Fehler, entsprechende Störfallreaktionen eingeleitet werden können. Diese Störfallabläufe werden vorab im reflektorischen Operator abgelegt und situationsbedingt aktiviert. Jeder Fehler aus dem Fehlerbaum korrespondiert mit einer Störfallreaktion, sofern der Fehler sicherheitsrelevant ist. Das gleichzeitige Auftreten mehrerer Fehler stellt hierbei die größte Herausforderung dar. Fehlerverkettungen werden vorab in der Fehlerbaumanalyse genau abgebildet. Letztendlich korrespondiert mit jedem sicherheitsrelevanten Fehlzustand, unabhängig davon ob es sich um einen Einzelfehler oder eine Fehlerverkettung handelt, eine Störfallreaktion.

### 6.3.3 Störfallreaktionen

Folglich muss für jeden möglichen Fehler bzw. für jede Fehlerkombination festgelegt werden, welche Störfallreaktion unter welchen Randbedingungen eingeleitet werden soll. Als Randbedingungen sind beispielsweise die aktuelle Fahrgeschwindigkeit, die Anzahl der Fahrzeuge im Konvoi oder die Unterschiede der Fahrzeuge bzgl. Antriebskraft und Fahrzeugmasse zu sehen.

Für den autonomen Fahrbetrieb eines Einzelfahrzeugs existieren drei Störfallreaktionen:

- Fahrt mit eingeschränkter Geschwindigkeit,
- Anhalten des Fahrzeugs mittels Motorbremsung,
- Anhalten des Fahrzeugs mittels Schnellbremsung.

Werden Fahrzeuge im Konvoi betrieben, kommen weitere Störfallreaktionen in Betracht:

- Konvoifahrt mit verringerter Geschwindigkeit und/oder erhöhtem Abstand,
- Auflösen des Konvois infolge von Störungen der Folgefahrzeuge,
- Anhalten des Konvois infolge von Störungen des Führungsfahrzeugs durch
  - Bremsung im asynchronen (normalen) Betriebsmodus des Linearmotors,
  - Bremsung im synchronen Betriebsmodus des Linearmotors,
  - Schnellbremsung mittels mechanischer Bremse.

Zentrale Stelle für Störfallreaktionen ist die Konfigurationssteuerung, die vom Funktionsblock *Gefahrenliste* (siehe Bild 6.2) einen eventuellen Störfall mitgeteilt bekommt. Dazu wird der Regelkreisstruktur für die Abstandsregelung aus Kap. 5.2 die Konfigurationssteuerung vorgeschaltet. Ausgaben der Konfigurationsteuerung sind der Sollabstand sowie die entsprechende Störfallreaktion.

Im Konvoibetrieb dürfen vorausfahrende Fahrzeuge keine willkürlichen Bremsmanöver ausführen. Die Einhaltung der Bremskorridore nach Bild 3.21 ist unbedingt zu beachten. Daher sind nur definierte und bereits während der Phase der Konvoikoordination vereinbarte Fahrmanöver zulässig.

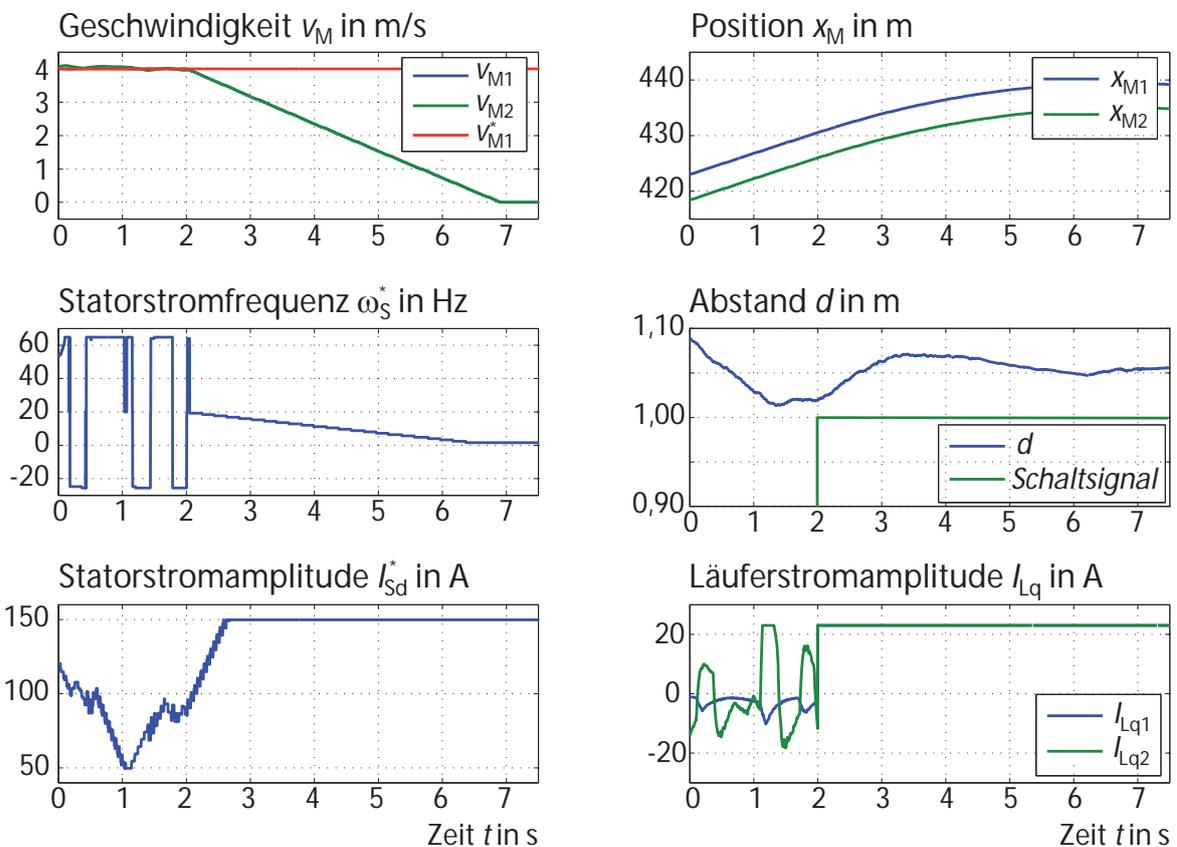
Eine Reduzierung der Geschwindigkeit erfolgt, wenn z.B. keine schwerwiegenden Fehler auftreten. Gegebenenfalls kann zusätzlich der Abstand zwischen den Fahrzeugen vergrößert werden. Fehlerquellen sind beispielsweise Störungen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (z.B. Fehlerrate über 40%). Ein beispielhaftes Fahrmanöver bezüglich einer Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit eines Fahrzeugverbundes wurde bereits in Bild 5.13 dargestellt. Wie dort bereits erläutert, ist insbesondere bei längeren Fahrzeugkonvois die Eigenschaft der Kolonnenstabilität ein entscheidendes Kriterium hinsichtlich der Betriebssicherheit.

### **Nothalt mittels synchroner Betriebsweise des Linearmotors**

Muss ein Nothalt des Konvois herbeigeführt werden und ist der Motor voll funktionsfähig, so kann der Konvoi mittels Motorbremsung sicher abgebremst werden. Dazu wird der Motor synchron betrieben, d. h. dass das Fahrzeug und die Wanderwelle im Stator mit der gleichen Geschwindigkeit voranschreiten. Um das Bremsmanöver einzuleiten, sendet der Konvoi-Master den Startbefehl an die übrigen Fahrzeuge sowie an die Streckensteuerung. Anschließend werden die mit der Fahrzeuggeschwindigkeit korrespondierende Statorfrequenz sowie die maximale Statorstromamplitude aufgeschaltet. Im Laufe des Bremsmanövers wird die Statorstromfrequenz sukzessive reduziert, bis die Fahrzeuge anhalten. Unter der Voraussetzung, dass alle Motoren die erforderliche Bremswirkung bereitstellen können, kann der Konvoi stets sicher zum Stillstand abgebremst werden.

Wie in Bild 6.15 zu sehen ist, wird nach ca. 2 s der Nothalt eingeleitet. Der Statorstrom sowie die beiden Läuferströme werden erhöht und die Statorstromfrequenz wird entsprechend auf die Fahrgeschwindigkeit abgestimmt. Der Abstand zwischen den beiden Versuchsfahrzeugen bleibt in etwa gleich. Die in Bild 6.15 zu erkennenden Abweichungen

können durch Ungenauigkeiten in der Positionserfassung oder durch Reibeinflüsse (z.B. bei Spurkranzanläufen) begründet werden.

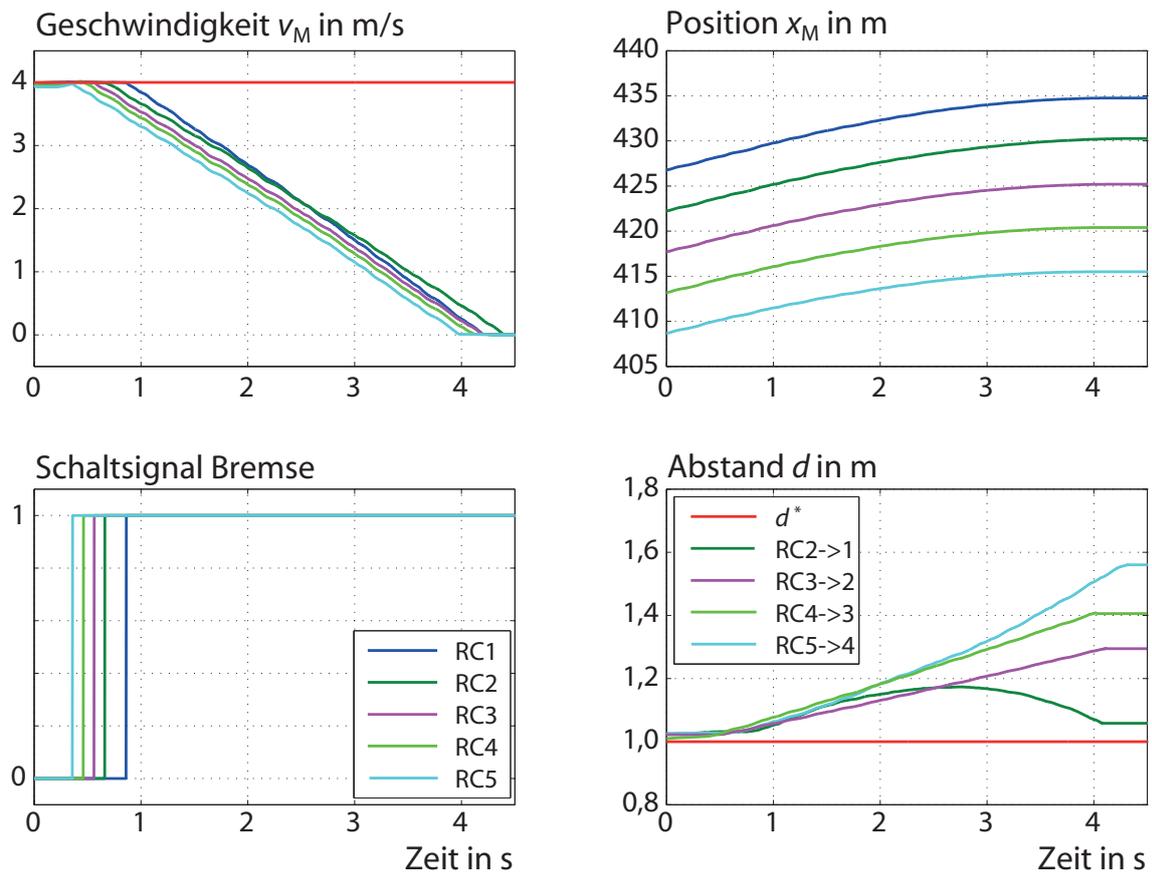


**Bild 6.15** Nothalt des Konvois mittels synchroner Betriebsweise des Linear motors

### Nothalt mittels Schnellbremsung

Liegt ein Ausfall des Linearantriebs vor, so muss ein Nothalt des Konvois mittels der mechanischen Schnellbremseinrichtung unverzüglich vorgenommen werden. Dazu wird das Fahrzeuggewicht über Bremsbacken direkt auf die Schiene gedrückt. Da die Reibparameter der Bremsbacken von Fahrzeug zu Fahrzeug unterschiedlich sein können, werden die Bremsungen der einzelnen Fahrzeuge zeitversetzt zueinander ausgelöst, beginnend mit dem letzten Fahrzeug im Konvoi. Ein beispielhafter Verlauf ist in Bild 6.16 dargestellt. Zwischen den simulierten Fahrzeugen, die alle als identisch angenommen werden, erfolgt lediglich ein geringer Zeitversatz (80 ms) zwischen den Schaltsignalen der Bremse. Die Bremseinrichtungen der beiden realen Versuchsfahrzeuge unterscheiden sich jedoch in der Beschaffenheit der Bremsbeläge. In Versuchsreihen bei trockenen Umgebungsbedingungen wurden die Bremskräfte für Fahrzeug 1 mit ca. 1820 N und für Fahrzeug 2 mit ca. 1580 N identifiziert. Aus dieser Differenz resultiert eine Verzögerungszeit für das Führungsfahrzeug (RailCab 1) von insgesamt 540 ms (bzw. 300 ms zu

Fahrzeug 2). Bild 6.16 zeigt, dass diese Verzögerungszeit erforderlich, damit sich der Sollabstand nicht unterschritten wird. Prinzipiell ist es natürlich auch möglich, den eingestellten Abstand von einem Meter als Reserve zu nutzen. Insbesondere im Falle höherer Fahrgeschwindigkeiten und unterschiedlichen Bremseigenschaften steigt ansonsten die Verzögerungszeit zu stark an.



**Bild 6.16** Nothalt des Konvois mittels mechanischer Bremswirkung



## 7. Zusammenfassung

Der automatische Konvoibetrieb mit geringen Fahrzeugabständen stellt ein Alleinstellungsmerkmal des Transportsystems RailCab dar. Die Voraussetzung hierfür ist der Einsatz der Linearantriebstechnik. Diese ermöglicht eine präzise Regelung der Fahrzeuglängsbewegung und eine exakte Prädiktion des Fahrprofils. Im Konvoibetrieb sind die einzelnen Fahrzeuge motorseitig über den gemeinsam befahrenen Stator miteinander verkoppelt. Dadurch wird jedoch nicht nur die Antriebskraft beeinflusst, sondern auch die Leistungsübertragung, die ebenfalls über den Linearantrieb erfolgt. Die für den Konvoibetrieb erforderlichen Funktionen, die von der Betriebsleittechnik über das Energiemanagement und die Regelungstechnik bis hin zur Sicherheitstechnik reichen, wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt.

Dazu wurde zunächst aufgrund der hohen Systemkomplexität der RailCabs ein funktionsorientierter, hierarchischer Systementwurf herangezogen, um Funktionen voneinander abzugrenzen und Wechselwirkungen zu beschreiben. Bedingt durch die örtliche Verteilung des Antriebs aber auch durch die Abstandsregelung wurde die bestehende Betriebsleittechnik der RailCabs für einen kooperativen Betrieb im Konvoi mit mehreren Fahrzeugen erweitert. Die Differenzierung zwischen kontinuierlichen Regelfunktionen und nachrichtenbasierten Kommunikationsabläufen wurde auf die Betriebsleittechnik übertragen. Eine nachrichtenbasierte Kommunikation wurde eingeführt, um insbesondere Fahrmanöver oder Störfallabläufe zu koordinieren. Durch eine Integration von Verfahren zur Fehlererkennung und Fehlerbehandlung kann ein zuverlässiger Datenaustausch sicher gewährleistet werden.

Eine Besonderheit des vorgestellten Schienentransportsystems stellt der doppelt gespeiste Linearmotor dar, der neben dem Antreiben und Bremsen der Fahrzeuge eine berührungslose Leistungsübertragung in das Bordnetz der Fahrzeuge ermöglicht. Da die Fahrzeuge während einer Konvoifahrt über den Motor miteinander energetisch verkoppelt sind, muss ein optimaler Betriebspunkt für die Gesamtheit aus Stator und Läufern eines Fahrzeugverbundes ermittelt werden. Eine Untersuchung unterschiedlicher Betriebsarten zeigte, dass sich die Leistungsflüsse des Linearmotors steuern lassen, indem neben dem abstandsgeregelten auch ein gekoppelter Betrieb oder ein Schiebetrieb eingestellt wird.

Somit kann die Leistungsübertragung gezielt hinsichtlich individueller Fahrzeuganforderungen beeinflusst werden.

Für den Konvoibetrieb ist eine Regelungsstrategie entworfen worden, die einen minimalen und von der Fahrgeschwindigkeit unabhängigen Fahrzeugabstand ermöglicht. Das vorgestellte Verfahren nutzt eine gezielte Vorgabe der Bewegungstrajektorie des herannahenden Fahrzeugs. Diese Trajektorie wird bereits während einer Koordinationsphase zwischen den Fahrzeugen kommuniziert. Eine weitere Herausforderung hinsichtlich der Konvoifahrt stellen Stör- und Fehlerfälle dar. Zur Beherrschung dieser Fälle ist im Rahmen dieser Arbeit eine umfangreiche Gefahren- und Fehleranalyse durchgeführt worden. Aufbauend darauf sind Maßnahmen zur Fehlerdetektion für Betriebsleittechnik, Antrieb, Energieversorgung und Längsdynamikregelung erarbeitet worden. Ein Fehlermanagement wertet erkannte Aktor- und Sensorfehler aus und leitet entsprechende Stör- und Notfallabläufe ein. Im Fahrversuch konnten schließlich die erarbeiteten Betriebs- und Regelstrategien erprobt und validiert werden.

Insgesamt wurde in dieser Arbeit gezeigt, dass mit den vorgestellten Betriebs- und Regelstrategien ein Konvoibetrieb der RailCabs mit Fahrzeugabständen von weniger als einem Meter sicher gewährleistet wird. Die betriebstechnischen Voraussetzungen für ein Zusammenführen und Auflösen von Konvois sowie für Folgefahrten wurden entwickelt. Zudem wurden alle im Versuchsbetrieb erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen getroffen. Somit konnten erstmals im Fahrversuch auf einer Außenanlage Schienenfahrzeuge abstandsgeregt betrieben werden.

Da bisher aber nur die prototypische Realisierung auf der RailCab-Versuchsanlage erfolgte, müssen die hier vorgestellten Strategien in weiterführenden Arbeiten vor allem hinsichtlich Übertragbarkeit in reale Anwendungen geprüft und validiert werden. Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Versuchsmöglichkeiten wurden mittels Simulations- und Virtualisierungstechniken zwar erweitert, so dass der Konvoibetrieb für fünf Fahrzeuge getestet werden konnte. Dennoch ist eine Ausweitung auf eine größere Anzahl von Fahrzeugen in zukünftigen Arbeiten erstrebenswert. Als kostengünstige Alternative zum DGALM wurde im Kontext des RailCab-Projekts bereits oft die fahrwegseitige Ausstattung mit einer passiven Reaktionsschiene diskutiert. In diesem Fall kann der Kommunikationsaufwand deutlich reduziert werden und die Abstandserfassung über Sensoren erfolgen. Die in dieser Arbeit entwickelten Betriebs- und Regelstrategien, die auf der derzeitigen Realisierung der Leittechnik basieren, können jedoch auch dann eingesetzt werden.

# Literaturverzeichnis

- [ADG+09] Adelt, P.; Donoth, J.; Gausemeier, J.; Geisler, J.; Henkler, S.; Kahl, S.; Klöpper, B.; Krupp, A.; Münch, E.; Oberthür, S.; Paiz, C.; Podlogar, H.; Pormann, M.; Radkowski, R.; Romaus, C.; Schmidt, A.; Schulz, B.; Vöcking, H.; Witkowski, U.; Witting, K.; Znamenshchikov, A.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2008
- [Als12] Alstom – Alimentation par le sol. URL: <http://www.transport.alstom.com/>, 10.08.2012
- [And01] Andreasson, I.: Innovative Transit Systems. VINNOVA Report VR 2001-3, The Swedish Agency of Innovation Systems, Stockholm, 2001
- [Aus12] AUSTRANS – The Smart People Mover for Today. URL: <http://www.prtconsulting.com/>, 10.08.2012
- [Bal09] Balewski, C.: Regelverfahren für die Längsführung von Schienenfahrzeugen. Studienarbeit, Universität Paderborn, 2009
- [BDF+09] Baier, M.; Daniel, A. F.; Enning, M.: Fahrzeugtechnische Machbarkeitsstudie eines selbstangetriebenen Güterwagens für das System FlexCargoRail. In: ZEVrail 133, Heft 1-2, S. 52-58, Georg Siemens Verlag, 2009
- [BKL+06] Blanke, M.; Kinnaert, M.; Lunze, J.; Staroswiecki, M.: Diagnosis and Fault-Tolerant Control. Springer-Verlag, Heidelberg, 2006
- [Boc01] Bock, U.: Betriebs- und Kommunikationskonzepte für dynamische Rendezvous-Manöver von Zügen. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2001
- [Bom12a] Bombardier – PRIMOVE: Fahrdrahtloser Betrieb. URL: <http://www.bombardier.com/de/transportation/nachhaltigkeit/technologie/primove-fahrdrahtloser-betrieb>, 10.08.2012

- [Bom12b] Bombardier – Advanced Rapid Transit. URL: <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-vehicles/advanced-rapid-transit?docID=0901260d8000a648>, 10.08.2012
- [Bör06] Börcsök, Josef: Funktionale Sicherheit. Hüthig Verlag, Heidelberg, 2006
- [Bör07] Börcsök, Josef: Elektronische Sicherheitssysteme. 2. Auflage, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2007
- [Bos98] Bossert, M.: Kanalcodierung. Teubner Verlag, Stuttgart, 1998
- [BP97] Beitz, W.; Pahl, G.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung. Springer, Berlin, 4. Auflage, 1997
- [Buc09] Buchholz, O.: Untersuchungen zur Arbeitspunktsteuerung eines doppelt gespeisten Linearmotors für einen Fahrzeugkonvoi. Studienarbeit, Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, Universität Paderborn, 2009
- [Cre92] Cremer, M.: On Convoy-Stable Control Laws for Automatically Driven Vehicle Clusters. In: Proc. Conference on Road Transport Informatics and Intelligent Vehicle Highway Systems, Florence, Italy, 1992
- [CVH+07] Carnegie, J. A.; Voorhees, A. M.; Hoffman, P. S.; Hamilton, B. A.: Viability of Personal Rapid Transit in New Jersey. Final Report, New Jersey Department of Transportation Bureau of Research, USA, 2007
- [DFG12] Deutsche Forschungsgemeinschaft Schwerpunktprogramm 1305 – Regelungstheorie digital vernetzter Systeme. URL: <http://spp-1305.atp.rub.de/>, 10.08.2012
- [DIN01] Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/ elektronischer/ programmierbarer elektronischer Systeme. Norm DIN EN 61508, Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [DIN09] Fehlerbaumanalyse. DIN 25424, Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [DM05] Drewes, J.; May, J.: Structured approach of a generic (signalling) hazard list for railway (interlocking) systems. 5th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Hannover, 2005
- [DM07] Drewes, J.; May, J.: Entwicklung strukturierter Gefahrenlisten am Beispiel-system Stellwerk. Signal + Draht, Nr. 99, 2007, S. 17-21

- [EMS10] Schäfer, W.; Eckardt, T.; Henke, C.; Kaiser, L.; Kerstan, T.; Rieke, J.; Tichy, M.: Der Softwareentwurf im Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme. In 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 272, S. 3-22, März 2010
- [FGK+04] Frank, U.; Giese, H.; Klein, F.; Oberschelp, O.; Schmidt, A.; Schulz, B.; Vöcking, H.; Witting, K.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 155, Paderborn, 2004
- [FGM+07] Frank, U.; Giese, H.; Müller, T.; Oberthür, S.; Romaus, C.; Tichy, M.; Vöcking, H.: Potenziale und Risiken der Selbstoptimierung für die Verlässlichkeit mechatronischer Systeme. 5. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, HNI Verlagsschriftenreihe, Band 210, Paderborn, 2007
- [Fla03] Flacke, W.: Koordinatensysteme in ArcGIS. 1. Auflage. Halmstad Points, Verlag, Norden, 2003
- [Fra06] Frank, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2006
- [GBS+04] Giese, H.; Burmester, S.; Schäfer, W.; Oberschelp, O.: Modular Design and Verification of Component-Based Mechatronic Systems with Online-Reconfiguration. In: Proc. Of 12th ACM SIGSOFT Foundations of Software Engineering 2004 (FSE 2004), Newport Beach, USA, ACM Press, November 2004, S. 179-188
- [Geh00] Gehring, O.: Automatische Längs- und Querführung einer Lastwagenkolonne. Dissertation, Fakultät für Verfahrenstechnik und Technische Kybernetik, Universität Stuttgart, 2000
- [GEK01] Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [GFH+07] Gausemeier, J.; Frank, U.; Henke, C.; Low, C. Y.: From Domain-Spanning Conceptual Design to Domain-Specific Controller Design of Self-

- Optimizing-Systems. In: Proceedings of Systems Engineering for Future Capability, February 12-13, 2007, SEIC Loughborough, England, 2007
- [GFL+07] Gausemeier, J.; Frank, U.; Low, C. Y.; Henke, C.: Synergetic Impacts of Domain-Spanning Conceptual Design on Control of Self-Optimizing Systems. In: 1st Annual Systems Conference, April 9-12, 2007, Honolulu, USA, 2007
- [GHH+06] Giese, H.; Henkler, S.; Hirsch, M.; Tichy, M.: Modellbasierte Entwicklung vernetzter, mechatronischer Systeme am Beispiel Konvoifahrt autonom agierender Schienenfahrzeuge. 4. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 189, Paderborn, 2006
- [GL00] Gausemeier, J.; Lückel, J.: Entwicklungsumgebungen Mechatronik: Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 80, Paderborn, 2000
- [Glü85] Glück, H.: Aerodynamik der Schienenfahrzeuge. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1985
- [Gor09] Gorte, N.: Fehlerüberwachungssystem für autonome Schienenfahrzeuge. Studienarbeit, Universität Paderborn, 2009
- [Got12] Gottwald Automated Guided Vehicles, URL: <http://www.gottwald.com/gottwald/site/gottwald/de/products/agv.html>, 10.08.2012
- [GTB+03] Giese, H.; Tichy, M.; Burmester, S.; Schäfer, W.; Flake, S.: Towards the Compositional Verification of Real-Time UML Designs'. In Proc. of the European Software Engineering Conference (ESEC), Helsinki, Finland, ACM Press, September, 2003, S. 38-47.
- [Gur91] Gurgel, K.-W.: Erfahrungen mit dem Satelliten-Navigationssystem GPS-Genauigkeiten an Land und auf See. In: Earth and Environmental Science. Ocean Dynamics. Volume 44, Number 1, 1991, pp. 35-49
- [Hen03] Henke, M.: Antrieb mit doppelt gespeistem Linearmotor für ein spurgeführtes Bahnfahrzeug. Dissertation, Fachgebiet für Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, Universität Paderborn, 2003
- [HFB06] Henke, C.; Fröhleke, N.; Böcker, J.: Advanced Convoy Control Strategy for Autonomously Driven Railway Vehicles. IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, September 17-20, 2006, Toronto, Kanada, 2006

- [HL08] Hirche, S.; Lunze, J.: Digital vernetzte Regelungssysteme. At – Automatisierungstechnik, Nr. 1, 2008, S. 1-19
- [Hit12] Webseite Hitachi – Linear Motor Driven System. URL: <http://www.hitachi-rail.com/products/rv/linear/index.html>, 10.08.2012
- [Hes06] Hestermeyer, T.: Strukturierte Entwicklung der informationsverarbeitung für die aktive Federung eines Schienenfahrzeugs. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, 2006
- [HTS+08a] Henke, C.; Tichy, M.; Schneider, T.; Böcker, J.; Schäfer, W.: Organization and Control of Autonomous Railway Convoys. 9th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC 08), October 6-9, 2008, Kobe, Japan, 2008
- [HTS+08b] Henke, C.; Tichy, M.; Schneider, T.; Böcker, J.; Schäfer, W.: System Architecture and Risk Management for Autonomous Railway Convoys. 2nd Annual IEEE Systems Conference, 7.-10. April 2008, Montreal, Canada, 2008
- [HVB+05] Henke, C.; Vöcking, H.; Böcker, J.; Fröhleke, N.; Trächtler, A.: Convoy Operation of Linear Motor Driven Railway Vehicles. In: Proceedings of the Fifth International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, September 25-28, 2005, Kobe, Japan, 2005
- [IC93] Ioannou, P. A.; Chien, C. C.: Autonomous Intelligent Cruise Control. IEEE Transactions on Vehicula Technology, Vol. 42, 1993
- [Ioa97] Ioannou, P. A.: Automated Highway Systems, Plenum Press, New York, USA 1997
- [Irv78] Irving, J. H.: Fundamentals of Personal Rapid Transit. D. C. Heath and Company, Lexington, Massachusetts, Toronto, Canada, 1978
- [Ise08] Isermann, R.: Mechatronische Systeme. Springer-Verlag, Berlin, 2008
- [KBS+97] Kallenbach, E.; Birli, O.; Saffert, E.; Schäffel, C.: Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte. VDI Berichte 1315 – Mechatronik im Maschinen- und Fahrzeugbau, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997
- [KD05] Khatir, M.; Davidson, E.: Decentralized Control of a Large Platoon of Vehicles Operating on a Plane with Steering Dynamics. American Control Conference, June 8-10, 2005, Portland, Oregon, USA, 2005, pp. 2159-2165

- [Krü03] Krüger, M.: Zugsicherung in Deutschland – von der LZB zu ETCS. Eisenbahningenieur, 54(2), 2003
- [Leo76] Leonhard, W.: Zeitoptimale Scherenregelung. Electrical Engineering, Volume 58, Number 1, Springer Verlag, 1976, S. 61-67
- [Leo00] Leonhard, W.: Regelung elektrischer Antriebe. 2. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2000
- [Lev95] N. Leveson: Safeware, System Safety and Computers. Addison-Wesley, 1995
- [LGJ+99] 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, USA, 99. 1020-1025
- [LHL01] Lückel, J.; Hestermeyer, T.; Liu-Henke, X.: Generalization of the Cascade Principle in view of a Structured Form of Mechatronic Systems. In: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2001), Band 1, Como, Italy, 2001
- [Lin90] Lindemann, U.: Entwurf eines selbsteinstellenden, mehrachsigen Flugreglers mit lernender Vorsteuerung. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1990
- [Lit01] Litz, L.: Grundlagen der Automatisierungstechnik. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2005
- [LPF+04] Li, R.; Pottharst, A.; Fröhleke, N.; Böcker, J.: Energy Storage Scheme for Rail-guided Shuttle using Ultracapacitor and Battery. 11th International Power Electronics and Motion Control Conferences, EPE-PEMC 2004, September 2004, Riga, Latvia
- [LW05] Lutz, H., Wendt, W.: Taschenbuch der Regelungstechnik. 6. erweiterte Auflage, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2005
- [Lue00] Lückel, J.: Systemkonzept Neue Bahntechnik Paderborn, Das 4. Internationale HNI-Symposium, 2000, Paderborn
- [LYB+06] Lian, F. L.; Yook, J. K.; Tilbury, D. M.; Moyne, J.: Network Architecture and Communication Modules for Guaranteeing Acceptable Control and

- Communication Performance for Networked Multi-Agent Systems. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics 2, February 2006
- [LG00] Lygeros, J.; Godbole, D.: A Fault Tolerant Control Architecture for Automated Highways. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Band 8, Nr. 2, März 2000
- [Mar04] Martinus, Marcus Alexander: Funktionale Sicherheit von mechatronischen Systemen bei mobilen Arbeitsmaschinen. Dissertation Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München, 2004
- [Mas12] Masdar City PRT. URL: <http://www.2getthere.eu/>, 10.08.2012
- [May01] Mayr, R.: Regelungsstrategien für die autonome Fahrzeugführung. Springer-Verlag, Heidelberg, 2001
- [Nau00] Naumann, R.: Modellierung und Verarbeitung vernetzter intelligenter mechatronischer Systeme. Nr. 318 in VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 20. VDI Verlag, Düsseldorf, 2000
- [Nav11] Navilock NL-403p – Datenblatt. URL: <http://www.navilock.de/>, 05.01.2011
- [NBP12] Neue Bahntechnik Paderborn (NBP). URL: <http://www.railcab.de>, 10.08.2012
- [NP04] Naumann, P.; Pacht, J. Leit- und Sicherungstechnik im Bahnbetrieb – Fachlexikon. 2. Auflage, Tetzlaff Verlag, Hamburg 2004
- [OM07] Oyamada, N.; Mizui, K.: A Study on Inter-Vehicle Communication Experiments Using Wireless LAN. 9th International Conference on Advanced Communication Technology, February 12-14, 2007, Phoenix Park, Republic of Korea, 2007, pp. 2192-2195
- [Ort02] Ortmann, T.: Arbeitspunktbestimmung für einen Langstator-Linearmotor mit Energieübertragung. Diplomarbeit, Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, Universität Paderborn, 2002
- [Pac08] Pacht, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. B. G. Teubner, Stuttgart, 2000
- [Par12] Park Shuttle. URL: <http://www.2getthere.eu/>, 10.08.2012
- [PBS+04] Pottharst, A.; Baptist, K.; Schütze, O.; Böcker, J.; Fröhleke, N.; Dellnitz, M.: Operating Point Assignment of a Linear Motor Driven Vehicle Using

- Multiobjective Optimization Methods. 11th International Power Electronics and Motion Control Conferences, EPE-PEMC 2004, September 2004, Riga, Latvia
- [Pot06] Pottharst, A.: Energieversorgung und Leittechnik einer Anlage mit Linearmotor getriebenen Bahnfahrzeugen. Dissertation, Fachgebiet für Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, Universität Paderborn, 2006
- [Rad08] Raddatz, K.: Funkdatenübertragung für eine Versuchsanlage mit autonomen Schienenfahrzeugen. Diplomarbeit, Fachgebiet für Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, Universität, 2008
- [RH07] Radkowski, R.; Henke, C.: Einsatz von Virtual Reality zur Untersuchung realer und simulierter mechatronischer Systeme am Beispiel der neuen Bahntechnik Paderborn, 10. IFF-Wissenschaftstage, 27.-28. Juni 2007, Magdeburg, 2007
- [RKR05] W. Reinelt, W. Klier, G. Reimann: Systemsicherheit des Active Front Steering. at – Automatisierungstechnik 53, Oldenbourg Verlag, 2005
- [RS06] Roberson, D.; Stilwell, D.: Decentralized Control and Estimation for a Platoon of Autonomous Vehicles with a Circulant Communication Network. American Control Conference, June 14-16, Minneapolis, USA, 2006
- [RWH08] Radkowski, R.; Wassmann, H.; Henke, C.: Use of Augmented Reality to Support the Visual Analysis of Hardware-in-the-Loop Simulations. In: CIRP Design Synthesis 2008, April 7-9, Enschede, Netherlands, 2008
- [Sbd11] Statistisches Bundesamt Deutschland. URL: <http://www.destatis.de>, 06.04.2011
- [Sch01] Schildknecht, T.: Dataeagle DE1000, Bedienungsanleitung, 2001
- [Sch05] Schöller, O.: Öffentliche Mobilität: Perspektiven für eine nachhaltige Verkehrsentwicklung. VS Verlag für Sozialwissenschaften/GWV, 2005
- [Sch07] Schnieder, E.: Verkehrsleittechnik – Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs. Springer-Verlag, Heidelberg, 2007
- [Sch09] Schröder, D.: Elektrische Antriebe – Grundlagen. Springer-Verlag, Heidelberg, 2009

- [SI02] A. Schwarte; R. Isermann: Model-Based Fault Detection of Diesel Intake with Common Production Sensors. SAE technical paper 2002-01-1146, SAE World Congress, Detroit, USA, Mar 2002
- [SD92] Sheikholeslam, S.; Desoer, C.: 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
- [SD93] Sheikholeslam, S.; Desoer, C.: Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles with no Communication of Lead Vehicle Information: A System Level Study. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 42, 1993
- [Shl78] Shladover, S. E.: Longitudinal Control of Automated Guidway Transit Vehicles Within Platoons. Transactions of the ASME, Vol. 100, 1978
- [Sie11] Siemens – U-Bahn RUBIN. URL: [http://www.siemens.com/press/pool/de/pp\\_ts/2007/sc\\_upload\\_file\\_sots200703\\_04\\_%28ts-rubin-u3%29\\_300dpi\\_1440222.jpg](http://www.siemens.com/press/pool/de/pp_ts/2007/sc_upload_file_sots200703_04_%28ts-rubin-u3%29_300dpi_1440222.jpg), 23.03.2011
- [SJN06] Schach, R.; Jehle, P.; Naumann, R.: Transrapid und Rad-Schiene-Hochgeschwindigkeitsbahn. Springer-Verlag, Heidelberg, 2006
- [Sky12] Skytrain. URL: <http://www.skytrain.info/>, 10.08.2012
- [SLL10] Schlesinger, M.; Lindenberger, D.; Lutz, C.: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Studie für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Basel, Köln, Osnabrück, August 2010
- [Sta95] Stamatis, D. H.: Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from theory to execution. ASQC Quality Press, Milwaukee, USA, 1995
- [Sti06] Stiller, C.: Cooperative Cognitive Automobiles and Diversity in Cognition. In: Proc. Of the 4th IFAC-Symposium on Mechatronic Systems, September 12-14, 2006, Heidelberg, 2006, pp. 980-985
- [SH99] Swaroop, D.; Hedrick, J. K.: Constant Spacing Strategies for Platooning in Automated Highway Systems. In: ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control 121, September 1999
- [Tic09] Tichy, M.: Gefahrenanalyse selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fachgebiet Softwaretechnik, Universität Paderborn, 2009

- [Ton06] Tondl, P.: Dezentrale Verteilung von Verkehrsinformationen durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Universität Hannover, 2006
- [Trä06] Trächtler, A.: RailCab – mit innovativer Mechatronik zum Schienenverkehrssystem der Zukunft, VDE Kongress 2006, Fachtagungsberichte der ETG, GMA, DGBMT, Band 2, 2006, Aachen
- [Tra12] Transrapid. URL: <http://www.transrapid.de/>, 10.08.2012
- [Ult12] ULTra Global PRT. URL: <http://www.ultraglobalprt.com/>, 10.08.2012
- [TV03] Tanenbaum, A.; Van Steen, M.: Verteilte Systeme. Pearson Studium, München, 2003
- [VDI03] VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, Berlin, Beuth 2003
- [Vec12] Vectus PRT. URL: <http://www.vectuspirt.com/>, 10.08.2012
- [Wer11] Werdich, M.: FMEA – Einführung und Moderation. Springer-Verlag, Heidelberg, 2011
- [Wot10] Wotodzo, Kwaku Louis: Betriebskonzept für Rendezvous-Manöver von autonomen Schienenfahrzeugen. Diplomarbeit, Universität Paderborn, 2010
- [Wue06] Wüst, Eugen: Regelverfahren von Konvoifahrten autonomer Schienenfahrzeuge mit Linearmotor. Diplomarbeit, Universität Paderborn, 2006
- [Yan04] Yang, B.: Regelung der Längs- und Nickbewegung des Linearmotors für ein vollaktives spurgeführtes Bahnfahrzeug. Dissertation, Fachgebiet für Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, Universität Paderborn, 2004
- [ZEA03] Zambou, N.; Enning, M.; Abel, D.: Längsdynamikregelung eines Fahrzeugkonvois mit Hilfe der Modellgestützten Prädiktiven Regelung. In: Telematik-Fachtagung 2003, VDI-Berichte 1785, 2003
- [Zam05] Zambou, N. Lagrange-basierte und modellgestützte Regelungsstrategie für die autonome Fahrzeugführung im Konvoi. VDI-Verlag, Fortschrittsberichte VDI Band 8, Düsseldorf, 2005

