



Abschlussbericht

zum Projekt

**Weiterentwicklung und Erprobung der Verzweigungstechnik
für einen energieeffizienten und sicheren Betrieb des
unterirdischen Gütertransportsystems CargoCap**

- Kurzfassung zur Veröffentlichung -

Auftraggeber: Deutsche Bundesstiftung Umwelt
An der Bornau 2
49090 Osnabrück

Aktenzeichen: 24592 / 02 – 21 / 0

Auftragnehmer: Ruhr-Universität Bochum
Arbeitsgruppe Baumaschinen- und Fördertechnik
Gebäude IC, Raum 1 / 151
Universitätsstr. 150
44801 Bochum

Bearbeitung: Dipl.-Ing. Stefan Aldejohann
In Zusammenarbeit mit der CargoCap GmbH, Bochum

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aktuelle Entwicklungen im Projekt CargoCap und Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	4
3	Informationen zum Projekt CargoCap	5
3.1	Hintergrund des Projekts	5
3.2	Der grabenlose Rohrvortrieb	6
3.3	Technische Darstellung	6
3.4	Die Modellstrecke.....	7
4	Projektteil „Weiterentwicklung der Verzweigungstechnik“	8
4.1	Hintergrundinformationen zur Verzweigungstechnik und Stand der Technik ...	8
4.1.1	Dissertation Hohaus und Weiterentwicklungsbedarf der Verzweigungstechnik	9
4.1.2	Andere spurgeführte Transportsysteme mit eigenständiger Fahrtrichtungsauswahl durch Fahrzeuge	9
4.2	Prinzipien für die Verzweigungstechnik.....	10
4.3	Quasistatische Betrachtung der Betriebslasten zur Vorauslegung	11
4.3.1	Mit Lastumlagerung	11
4.3.2	Ohne Lastumlagerung.....	11
4.3.3	Vergleich der Fälle mit Lastumlagerung und ohne Lastumlagerung	12
4.4	Ermittlung der Betriebslasten für 1:1-Fahrzeuge	13
4.4.1	Einflussfaktoren Last-Zeit-Verläufe.....	13
4.4.2	MKS-Modellbildung.....	14
4.4.3	Ergebnisse und Auswertung	14
4.4.4	Ermittlung der Betriebslasten für 1:1-Fahrzeuge bei Kurvenfahrt.....	15
4.5	Ermittlung der Betriebslasten bei Verzweigungsdurchfahrt für das Modellstreckenfahrzeug	16
4.5.1	Mehrkörpersimulation	16
4.5.2	Erweiterung der Modellstrecke und des Modellstreckenfahrzeugs	16
4.5.3	Versuchsreihen	18
4.6	Entwicklung eines schaltenden Weichenmoduls	19
4.6.1	Patentierete Prinziplösung.....	19
4.6.2	Das schaltende Weichenmodul für die Modellstrecke.....	21

4.6.3	Untersuchung der Schaltdynamik.....	21
4.6.4	Steuerungstechnische Implementierung.....	22
4.6.5	Gesamtsystem und Erkenntnisse aus der Erprobung.....	22
4.7	Unterstützende Weichenmodulbetätigung.....	24
5	Projektteil „Fahrzeugsteuerung an Streckenzusammenführungen“	26
5.1	Aufbau der Hardware und Software.....	27
5.1.1	Gesamtsystem und Hardware.....	27
5.1.2	Fahrzeugfirmware	28
5.1.3	Leitstandssoftware.....	28
5.1.4	Fahrzeugsimulator.....	29
5.2	Ortung der Fahrzeuge mit RFID und Optimierung.....	29
5.3	Sicherheitsmechanismus Watchdog.....	30
5.4	Anpassung der Antriebstechnik.....	31
5.5	Streckeneditor.....	32
5.6	Routenberechnung durch den Leitstand.....	34
5.7	Anpassung Fahrzeugsimulator	36
5.8	Ziele der Bewegungskoordination bei Abstandsregelung und Zusammenführungsregelung.....	37
5.8.1	Systematische Sicherheit.....	37
5.8.2	Fahrzeugdynamische Sicherheit.....	37
5.8.3	Durchsatz.....	37
5.8.4	Energieeffizienz	39
5.8.5	Pünktlichkeit	39
5.9	Koordinierung von Fahrbewegungen bei Abstandsregelung und Zusammenführungsregelung.....	40
5.9.1	Synchrone, quasi-synchrone und asynchrone Longitudinalregelung.....	40
5.9.2	Dezentrale Longitudinalregelung.....	40
5.9.3	Systeme der Verkehrsflussregelung.....	42
5.9.4	Anpassung der Führungsgeschwindigkeit	45
5.10	Verifikation der Regelungen	46
5.10.1	Verifikation der Longitudinalregelung.....	46
5.10.2	Verifikation der Zusammenführungsregelung durch Versuchsfahrten in einer Hardware-in-the-loop-Umgebung.....	46
5.10.3	Verifikation der Verkehrsflussregelung durch Simulation	48
6	Zusammenfassung und Ausblick	52

7	Literaturverzeichnis	55
8	Abbildungsverzeichnis	56

1 Einleitung

CargoCap ist ein neuartiges Transportsystem, um Stückgüter in Fahrrohrleitungen schnell, wirtschaftlich, zuverlässig und umweltfreundlich zu transportieren. In den Fahrrohrleitungen bewegen sich autonome Transporteinheiten, die jeweils zwei Europaletten aufnehmen können, mit einer weitestgehend konstanten Geschwindigkeit von 10 Metern pro Sekunde (36 km/h). Da CargoCap durch die unterirdische Streckenführung nur einen geringen Flächenbedarf hat und der elektrische Antrieb Schadstoffemissionen vermeidet, bietet CargoCap erhebliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Verkehrsträgern. Das CargoCap-System kann somit entscheidend dazu beitragen, aktuelle Verkehrs- und Umweltprobleme in Ballungsräumen zu lösen, indem Stau- und Feinstaubbelastungen vermieden werden und es somit nicht zu den daraus resultierenden volkswirtschaftlichen Schäden kommt. Neben dem Einsatz in Ballungsgebieten ist CargoCap auch für den Einsatz in der innerbetrieblichen Logistik bestens geeignet.

Das vorliegende Forschungsvorhaben wurde durch den Lehrstuhl für Maschinenelemente und Fördertechnik (LMF) bzw. die Arbeitsgruppe für Baumaschinen- und Fördertechnik (AG BMFT) an der Ruhr-Universität Bochum bearbeitet. Die AG BMFT betreibt auch die Modellstrecke, die als entwicklungsbegleitender Prüfstand dient und mit deren Hilfe die wesentlichen technischen Fragestellungen geklärt werden können. Darüber hinaus arbeitet die AG BMFT eng mit der CargoCap GmbH zusammen, zum Beispiel um Fragen im Zusammenhang mit der möglichen technischen Realisierung zu klären und Machbarkeitsstudien zu erstellen.

Das Forschungsvorhaben umfasst zwei wesentliche Schwerpunkte. Zielsetzung ist zum einen die Weiterentwicklung der CargoCap-spezifischen Verzweigungstechnik. Zum anderen wurde die Thematik „Methodische Betrachtung der Fahrverbandsbildung im Umfeld von Zusammenführungen“ bearbeitet.

Der Abschlussbericht erläutert zunächst die aktuellen Entwicklungen im Projekt CargoCap und berichtet über Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse (siehe Kapitel 2). Anschließend gibt Kapitel 3 einen Überblick zu den Hintergründen des Projekts CargoCap und beschreibt kurz die wesentlichen Merkmale der Technik.

In den zwei Hauptteilen des Projektabschlussberichts werden jeweils die Inhalte der beiden Projektteile erläutert. Im Berichtsteil zur Weiterentwicklung der Verzweigungstechnik (siehe Kapitel 4) wird zunächst der Stand der Technik und Forschung für Verzweigungsvorrichtungen autonomer Fahrzeuge beschrieben und die Notwendigkeit aus Sicht eines möglichst energieeffizienten und wirtschaftlichen Betriebs dargelegt. Auf dieser Basis werden die Anforderungen für eine Weiterentwicklung der vorhandenen Verzweigungstechnik erläutert. Es folgt eine Beschreibung der grundsätzlichen Prinziplösungen für die Verzweigungstechnik. Zu unterscheiden ist hierbei eine Variante mit Lastumlagerung, bei der das Fahrzeug in einer Verzweigung einseitig von der Schiene abgehoben wird und somit der beschränkte Querschnitt der Fahrrohrleitung optimal ausgenutzt werden kann; und eine Variante ohne Lastumlagerung, bei der die zur Richtungswahl verwendeten Weichenmodule lediglich eine Führungsfunktion innerhalb der Verzweigung haben. Für den Fall der Verzweigungstechnik mit Lastumlagerung wurde ein Mehrkörpersimulationsmodell erstellt, mit dem die bei Verzweigungsdurchfahrt auftretenden Last-Zeit-Verläufe

simuliert werden können. Neben der Geradeausfahrt in einer Verzweigung wurde auch der Fall der Kurvenfahrt simuliert. Die Validierung dieser Ergebnisse ist nur indirekt möglich, indem ein Vergleich mit dem Modellmaßstab stattfindet. Hierzu wurde zunächst ein weiteres MKS-Modell erstellt, das die Verzweigungsdurchfahrt eines Modellstreckenfahrzeugs abbildet.

Die hiermit simulierten Last-Zeit-Verläufe verhalten sich durch den ähnlichen Systemaufbau grundsätzlich ähnlich wie diejenigen des 1:1-Fahrzeugs. Um die Validierung mittels Versuchen durchführen zu können, wurde an der Modellstrecke zunächst ein Verzweigungsprüfstand realisiert und desweiteren ein Modellstreckenfahrzeug mit Weichenmodulen und Messtechnik ausgestattet, sodass eine Messung der Betriebslasten über Dehnungsmessstreifen unter Variation der Betriebsparameter erfolgen konnte.

Einen weiteren Themenschwerpunkt der Weiterentwicklung der Verzweigungstechnik stellte die Konstruktion von Prototypen für schaltende Weichenmodule sowie nach deren Fertigung und Erprobung dar. Hierbei wurden Versuche zur Schaltdynamik durchgeführt und die einzelnen Kernfunktionen getestet. Die Weichenmodule wurden in das zweite Modellstreckenfahrzeug eingebaut und in dessen Steuerung eingebunden. Die Versuche zur Schaltdynamik konnten zusammen mit den Versuchen zum Systemverhalten bei Verzweigungsdurchfahrt Erkenntnisse hinsichtlich des weiteren Entwicklungsbedarfs im Vorfeld einer Anwendung liefern. Einen weiteren Punkt dieses Projektteils stellt die Entwicklung einer unterstützenden Weichenmodulbetätigung dar. Ein solches System muss zur Anwendung kommen, wenn innerhalb kürzester Zeit und an einem bestimmten Ort, beispielsweise zwischen einer Verzweigung und einer direkt anschließenden Zusammenführung, eine Umschaltung der Weichenmodule erfolgen muss, das autonome Fahrzeug aber letztendlich keine Entscheidung über die Fahrtrichtung treffen braucht. In diesem Fall kann das Weichenmodul auch durch ein streckenseitiges Element betätigt werden. Hierfür wurde zunächst eine Prinziplösung erarbeitet und diese dann mittels Mehrkörpersimulation untersucht und ausgelegt. Das entwickelte System wurde gefertigt und in ein schaltendes Weichenmodul an der Modellstrecke implementiert, während die Auslöseeinheit streckenseitig aufgebaut wurde. Auch dieses System wurde erprobt und hinsichtlich eines Einsatzes in realen Anwendungen bewertet.

Während der Projektteil „Weiterentwicklung der Verzweigungstechnik“ primär maschinenbauliche Fragestellungen im Rahmen der Realisierung von CargoCap betrachtet, beinhaltet sich der zweite Projektteil „Methodische Betrachtung der Fahrverbandsbildung im Umfeld von Zusammenführungen“ die Bearbeitung von Fragestellungen, deren Ergebnisse die Grundlage für die Realisierung der Steuerungssoftware von CargoCap darstellen. Die Validierung erfolgt durch die Umsetzung in der Fahrzeugsteuerungssoftware.

Im zweiten Berichtsteil (vergleiche Kapitel 5) wird dem Leser zunächst ein Überblick über das bei CargoCap verwendete Konzept zur Fahrzeugsteuerung gegeben und die Hardware sowie die Software beschrieben. Es folgt ein kurzer Überblick über die verwendete Fahrzeugfirmware, die Leitstandssoftware sowie den im Rahmen der Softwareerprobung verwendeten Fahrzeugsimulator. Bestandteile der auf dem Fahrzeug implementierten Steuerungssoftware sind die Software zur Fahrzeugortung, die im Rahmen des Projekts optimiert wurde, und ein spezieller Sicherheitsmechanismus, der eine Fahrzeugkollision auch beim Ausfall von Fahrzeugrechnern vermeidet. Für die

Erprobung der Verzweigungstechnik mit Lastumlagerung an der Modellstrecke musste die Fahrzeugsoftware hinsichtlich der Antriebsansteuerung angepasst werden. Es wurde ein elektronisches Sperrdifferential implementiert, das beim Abheben einer Fahrzeugseite innerhalb des Verzweigungsprüfstands ein Hochdrehen des Antriebs verhindert, auch wenn kein Drehmoment mehr auf die Strecke übertragen werden kann. Da eine Zusammenführung von Streckenästen an der Modellstrecke nicht realisiert werden konnte, ein Zusammenführungsalgorithmus als Bestandteil der Fahrzeugsoftware an der Modellstrecke aber erprobt werden sollte, musste dies im Rahmen von Hardware-in-the-loop-Versuchen erfolgen, wobei reale Fahrzeuge mit simulierten virtuellen Fahrzeugen kommunizieren, die ein weitestgehend identisches Systemverhalten aufweisen. Um in diesem Zusammenhang Streckennetze abbilden zu können, wurde ein Streckeneditor programmiert. Als Ergänzung hierzu entstand eine Routenberechnung für die Fahrzeuge, die von der Leitstandssoftware übernommen wird. Die zu fahrende Route wird zusammen mit dem Fahrauftrag an das Fahrzeug übertragen und enthält Informationen darüber, wo sich an der Strecke Verzweigungen und Zusammenführungen befinden und wie vor dem Passieren dieser die Weichenmodule geschaltet werden müssen, um den richtigen Weg zu fahren.

Die Bewegung der Fahrzeuge muss vor einer Zusammenführung koordiniert werden, indem die Fahrzeuge ihre Fahrzeugzustandsinformationen, bestehend aus aktuellem Ort und aktueller Geschwindigkeit kontinuierlich über das Netzwerk mit den im Umfeld befindlichen Fahrzeugen austauschen. Im Umfeld einer Zusammenführung greift dann ein Algorithmus ein, der anhand der Verkehrssituation die Fahrzeugbewegungen basierend auf verschiedenen Kriterien koordiniert. Zielgrößen dieser Koordination sind ein hohes Sicherheitsniveau, ein hoher Durchsatz, Energieeffizienz und Pünktlichkeit. Auf dem Fahrzeug selbst arbeitet hierbei ein Longitudinalregler, der die Fahrtgeschwindigkeit entsprechend der Verkehrslage anpasst. Übergeordnet kann eine Verkehrsflussregelung eingesetzt werden, die insbesondere bei größeren CargoCap-Systemen mit einer größeren Anzahl autonomer Transporteinheiten sinnvoll ist, um das Fahrverhalten an Zusammenführungen hinsichtlich Durchsatz und Energieeffizienz zu optimieren. Existierende Lösungen werden vorgestellt und hinsichtlich der Anwendung bei CargoCap bewertet. Anschließend erfolgt eine Verifikation der Regelungen, bei der auf die Modellstrecke zurückgegriffen wird. So wird die Zusammenführungsregelung der Fahrzeuge mithilfe von Versuchsfahrten der realen Fahrzeuge an der Modellstrecke erprobt, die sich in einer Hardware-in-the-loop-Umgebung befinden und wiederum auf das Fahrverhalten virtueller Fahrzeuge reagieren müssen. Um die Verkehrsflussregelungen zu verifizieren, wurde deren Verhalten in einem größeren Streckennetz simuliert, sodass auch eine Bewertung hinsichtlich möglicher Staubildungen sowie energieeffizientem Fahrverhalten durchgeführt werden konnte.

Kapitel 6 fasst abschließend die durchgeführten Forschungen zusammen und stellt in einem Ausblick die noch offenen Fragestellungen vor, die mit Blick auf die Realisierung von CargoCap in Zukunft noch zu bearbeiten sind.

2 Aktuelle Entwicklungen im Projekt CargoCap und Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Der Antriebstechnikspezialist SEW Eurodrive GmbH & Co. KG aus Bruchsal plant, im Rahmen der Erweiterung seines Werkes am Standort Graben-Neudorf eine erste CargoCap-Referenzanlage zu realisieren, die der innerbetrieblichen Logistik dienen soll. Mit ca. 1.000 m Strecke werden fünf Stationen miteinander verbunden und so unterschiedliche Produktions- und Montageprozesse sowie ein Hochregallager miteinander vernetzt.

Diese Meldung wurde im April 2013 auf der Hannovermesse bekannt gegeben und ist online verfügbar unter: http://www.sew-eurodrive.de/presse/2013-04-08_1365083139_P.htm

Vorangegangen war die Erstellung einer Machbarkeitsstudie, die im Herbst 2012 bearbeitet worden ist und die Zuarbeit der Projektmitarbeiter (parallel zur Projektbearbeitung) erforderte. Somit hat dieses Projekt einen maßgeblichen Beitrag zu der voraussichtlich ersten großtechnischen Anwendung von CargoCap geliefert.

Der Öffentlichkeit wurde das Projekt CargoCap wiederholt bei verschiedenen Besucherterminen an der Modellstrecke vorgestellt. Herausragendes Ereignis dabei war die Teilnahme von CargoCap an der VDE-Techniknacht Ruhr am 11. Oktober 2013. An diesem Abend nutzten knapp 100 Besucher die Möglichkeit, sich über den Hintergrund des Projekts CargoCap und seine Technik zu informieren.

In die Bearbeitungszeit dieses Projekts fallen zwei Dissertationen. 2012 konnte Herr Hendrik Hölscher seine Dissertation mit dem Thema „Optimale Koordinierung der Fahrbewegungen autonomer Fahrzeuge im lokalen Umfeld von Verzweigungen und Zusammenführungen“ abschließen. Teilbereiche dieser Arbeit stimmen mit Projektinhalten überein. Hierzu sei auf die Unterkapitel 5.8 (Ziele der Bewegungskoordination bei Abstandsregelung und Zusammenführungsregelung), 5.9 (Koordinierung von Fahrbewegungen) und Teile von 5.10 (Verifikation der Regelungen) verwiesen.

Die Dissertation von Herrn Stefan Aldejohann befindet sich derzeit noch in Bearbeitung und ist inhaltlich teilweise deckungsgleich mit den Ergebnissen, die in Kapitel 4 vorgestellt werden. Die Dissertation soll im Laufe des Jahres 2014 abgeschlossen werden.

Darüber hinaus haben mehrere Studenten im Rahmen von Bachelor-, Master-, Semester- und Diplomarbeiten im Projekt mitgearbeitet und somit die Projektbearbeitung durch ihre Erkenntnisse unterstützt. Sie wurden bei ihren Arbeiten durch die Projektmitarbeiter betreut.

3 Informationen zum Projekt CargoCap

3.1 Hintergrund des Projekts

Die Zukunftsfähigkeit von Regionen hängt in einer verflochtenen Wirtschaft in starkem Maße von verkehrstechnischen Gegebenheiten, d.h. von den Erreichbarkeitsverhältnissen, den Dienstleistungen rund um den Transport sowie den Anforderungen des Handels und des produzierenden Gewerbes an den Warenverkehr ab. Sicherheit, Zuverlässigkeit sowie Individualisierung von Sendungsanforderungen rücken dabei immer stärker in den Fokus, um flexible Reaktionen auf sich rasch ändernde Kundenwünsche zu ermöglichen.

Ballungsräume, wie das Ruhrgebiet, haben auf den ersten Blick alle wirtschaftlichen Standortvorteile vereinigt, wie beispielsweise einen großen Nachfragemarkt, ein dichtes Verkehrsnetz und große Handelsunternehmen. Der zunehmende Transitverkehr innerhalb von Ballungsräumen bedingt zugleich jedoch Standortnachteile auf Grund der Überlastung der bestehenden Verkehrsinfrastruktur.

Zur Lösung dieses Konfliktes wurde das CargoCap-System nach Abbildung 3.1 entworfen, um Güter in Ballungsräumen durch unterirdische Fahrrohrleitungen schnell, wirtschaftlich, zuverlässig und umweltfreundlich transportieren zu können.



Abbildung 3.1: CargoCap-Fahrzeug in Fahrrohrleitung [Visaplan_2011]

CargoCap bietet auf Grund des geringen Fahrrohrdurchmessers (siehe Abbildung 3.2) und der dadurch ermöglichten günstigen Bauweise die Vorteile von bisherigen unterirdischen Transportsystemen bei gleichzeitig wesentlich geringeren Investitionskosten:

- Verbesserung der Erreichbarkeit verkehrstechnisch schwer zugänglicher Industriestandorte
- Reduzierung von „externen Kosten“, also den volkswirtschaftlichen Schäden durch Umweltbelastungen, Unfällen und Lärm, durch die teilweise

Verkehrsverlagerung in den Untergrund und Steigerung der Lebensqualität für die Anwohner

- Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit durch einen automatisierten vollelektrischen Betrieb

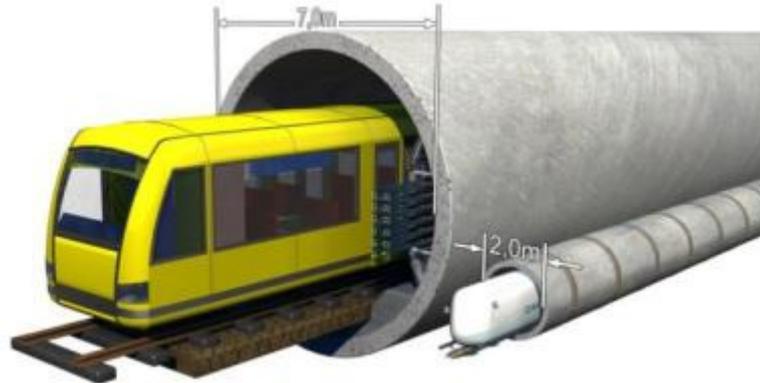


Abbildung 3.2: Vergleich der Durchmesser U-Bahn-Tunnel und CargoCap-Fahrrohrleitung
[Visaplan2011]

3.2 Der grabenlose Rohrvortrieb

Bei der Verlegung der Fahrrohrleitung kommt der grabenlose Rohrvortrieb zum Einsatz. Dieses Bauverfahren ist Stand der Technik und wird heute beispielsweise beim Bau von Abwasserkanälen eingesetzt. Dabei werden von einem Startschacht aus mit Hilfe einer Hauptpressstation vorgefertigte Vortriebsrohre durch den Baugrund bis in einen Zielschacht getrieben, der nach derzeitigem Stand bis zu 2.000 m entfernt sein kann. Der grabenlose Rohrvortrieb hat den Vorteil, dass die Verlegung der Rohrleitungen weitgehend unbemerkt und ohne Beeinträchtigung von Mensch und Natur erfolgt.

3.3 Technische Darstellung

Die CargoCap-Fahrzeuge fahren autonom und vollautomatisch durch das unterirdische Rohrleitungsnetzwerk. Der Laderaum ermöglicht die Aufnahme von zwei Europaletten und ist aktuell für ein Gesamtgewicht von 1.500 kg konzipiert. Der Rohrleitungsdurchmesser von 2,00m ermöglicht eine Palettenbeladungshöhe von ca. 1,25m. An Übergabestationen werden die Paletten mit marktüblicher Fördertechnik auf herkömmliche Verkehrsmittel wie Bahn und Lkw für den Ferntransport umgeschlagen oder von ihnen übernommen. Die Übergabepunkte im Ballungsraum befinden sich in unmittelbarer Nähe des Kunden. Dort können die Paletten beispielsweise über Vertikalförderer direkt ans Band einer Fertigungsstraße oder in das Lager eines Einkaufszentrums geliefert werden.

Die CargoCap-Fahrzeuge weisen eine aerodynamisch geformte Karosserie zur Verringerung des Luftwiderstands in geringen Rohrquerschnitten auf.

Eine wesentliche Voraussetzung für einen hohen Durchsatz ist das neuartige Weichenkonzept mit einem vollständig passiven Fahrweg: Das Fahrzeug besitzt für die Wahl der Fahrtrichtung zwei Weichenmodule. Diese drehen im Vorfeld einer Verzweigung die Weichenarme, die im Verzweigungsbereich in seitlich des Fahrwegs

montierte Führungsschienen eingreifen. So kann das Fahrzeug bei Nenngeschwindigkeit ohne eine Beeinflussung der nachfolgenden Fahrzeuge in die gewünschte Richtung fahren. Dieser Aufbau verringert zudem den Wartungsaufwand für die unterirdische Infrastruktur.

Die Steuerung eines Fahrzeugs übernimmt ein fahrzeugseitiger Industrie-PC. Der Informationsaustausch mit der übergeordneten Betriebsleittechnik und anderen Fahrzeugen erfolgt über ein WirelessLan-Tunnelfunksystem.

Die absolute Position der Fahrzeuge im Streckennetz wird mittels RFID bestimmt, wobei streckenseitig montierte Transponder als Wegmarken dienen. Zwischen zwei Transpondern wird die Position auf Basis der motorseitigen Inkrementalgeber interpoliert.

Laufrollen übernehmen die Tragfunktion der Fahrzeuge auf der Schiene, seitliche Spurführungsrollen stellen ihre Führung im Fahrweg sicher. Jede Laufrolle wird durch einen eigenen Synchronmotor angetrieben, wodurch eine optimale Traktion bei hoher Betriebssicherheit gewährleistet wird. Die Energieversorgung der Fahrzeuge erfolgt berührungslos nach dem Prinzip der induktiven Kopplung und ist somit wartungsfrei.

3.4 Die Modellstrecke

Seit Beginn seiner Mitarbeit am CargoCap-Projekt beschäftigt sich der Lehrstuhl für Maschinenelemente und Fördertechnik (LMF) bzw. nun die Arbeitsgruppe für Baumaschinen- und Fördertechnik (BMFT) an der Ruhr-Universität Bochum mit der technischen Konzeption und schrittweisen Realisierung des CargoCap-Systems. In diesem Zusammenhang entstand auch die Modellstrecke (siehe Abbildung 3.3), die als entwicklungsbegleitender Prüfstand dient und die technische Machbarkeit demonstriert. Sie wurde im Maßstab 1:2 oberirdisch in einer Kraftwerkshalle aufgebaut und hat zwei Fahrzeuge, die über allen wesentlichen technischen Komponenten des Systems verfügen.



Abbildung 3.3: Die Modellstrecke

4 Projektteil „Weiterentwicklung der Verzweigungstechnik“

4.1 Hintergrundinformationen zur Verzweigungstechnik und Stand der Technik

Die Verzweigungstechnik ist ein Kernbestandteil des CargoCap-Systems und war bereits früh Bestandteil der Forschung. So beschäftigte sich bereits die erste Dissertation zu CargoCap im Maschinenbau [Hohaus2009] mit der Verzweigungstechnik. Da zu diesem Zeitpunkt noch nicht alle Fragestellungen geklärt werden konnten, was auch auf die sich nachwievor ändernden Systemparameter zurückzuführen ist (so wurde der Durchmesser der Fahrrohrleitung 2008 im Rahmen der Marktpotentialanalyse auf 2,0m angehoben), bestand weiterer Forschungsbedarf. Viele der offenen Fragestellungen konnten im Rahmen dieses Projektes geklärt werden.

Im System CargoCap ist bei größeren Streckennetzen vorgesehen, dass die Fahrzeuge in dichtem Abstand in Fahrverbänden durch das Rohrleitungsnetz fahren. Da sie unterschiedliche Fahrtziele besitzen, müssen einzelne Fahrzeuge auch aus einem Fahrverband ausscheren können. Ebenso sollten sich an Zusammenführungen Fahrzeuge einfädeln können. Dies sollte keine Auswirkung auf die anderen Fahrzeuge haben.

Damit spurgeführte Fahrzeuge auf unterschiedliche Wege gelangen, werden in der Bahntechnik innerhalb des Fahrwegs Weichenzungen umgeschaltet, die als bewegliche Teile einer Weiche durch ihre Stellung die Fahrtrichtung des Zuges bestimmen. Über Blockabschnitte werden die Mindestabstände zwischen den Zügen festgelegt und ein Fahrweg kann für einen neuen Zug erst freigegeben werden, wenn zum einen der Blockabschnitt davor frei ist und zum anderen die Weichen die nun vorgesehene Stellung aufweisen. Dieses System lässt sich nicht auf CargoCap übertragen, da dann sehr große Abstände zwischen den einzelnen Fahrzeugen notwendig würden. Eine Einschränkung des möglichen Durchsatzes der Fahrrohrleitung wäre die Folge, auch würde bei einer geringeren Fahrzeugzahl aus aerodynamischen Gründen der Energiebedarf des einzelnen Fahrzeugs zur Erbringung einer Transportleistung ansteigen.

Wegen der Nachteile der klassischen Weichentechnik für spurgeführte Fahrzeuge wurde für CargoCap eine neuartige Verzweigungstechnik entwickelt, bei der der Fahrweg passiv ist und bei dem die Fahrzeuge aktiv über ihre Fahrtrichtung entscheiden, indem sie diese über die Stellung der Weichenmodule auswählen und innerhalb einer Verzweigung oder Zusammenführung durch seitliche Führungsschienen geführt werden. Diese konstruktive Lösung wurde erstmals durch das Patent DE 10035070A1 vorgestellt [Wagner_Hohaus_2002]. Diese Lösung hat darüber hinaus einen Vorteil bezüglich der Wartung und Instandhaltung des CargoCap-Systems: Die beweglichen mechanischen Elemente, die vermehrt einer Wartung bedürfen, befinden sich alle auf dem Fahrzeug und fahren zur Wartung aus der Fahrrohrleitung heraus. Die streckenseitigen Elemente sind unbeweglich und haben somit einen geringeren Wartungsaufwand.

4.1.1 Dissertation Hohaus und Weiterentwicklungsbedarf der Verzweigungstechnik

Die Dissertation von Lutz Hohaus entstand zu Beginn der Mitarbeit des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Fördertechnik an dem interdisziplinären Forschungsprojekt CargoCap, als viele technische Details noch nicht geklärt waren und auch die Modellstrecke noch nicht existierte. Die Arbeit stellt den ersten Meilenstein bei der technischen Entwicklung des CargoCap-Systems dar und bietet eine gute Grundlage, auf dieser Basis die noch offenen Fragestellungen zur Verzweigungstechnik zu klären.

In dieser Dissertation wird zunächst der Stand der Technik zu Verzweigungstechniken spurgeführter Fahrzeuge aufgearbeitet, die selbstständig über ihre Fahrtrichtung entscheiden können. Auf dieser Basis erfolgte die Entwicklung einer Prinziplösung für die Verzweigung. Die Arbeit erläutert die geometrischen Randbedingungen der CargoCap-Verzweigung und diskutiert die möglichen Massenschwerpunkte. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Mehrkörpersimulationsmodell erstellt, das im Modellmaßstab unter Zuhilfenahme von Ähnlichkeitsbetrachtungen die Verzweigungsdurchfahrt eines 1:4-Fahrzeugs auf Basis der damaligen 1,6m-Fahrrohrleitung abbildet. Die ermittelten Last-Zeit-Verläufe wurden mithilfe eines Verzweigungsprüfstandes validiert. Für alle untersuchten Beladungszustände wurden dynamische Überhöhungsfaktoren gegenüber den wirkenden statischen Lasten ermittelt und zudem kritische Beladungszustände identifiziert.

Nach Abschluss dieser Dissertation haben sich die Anforderungen an die Verzweigungstechnik von CargoCap allerdings weiterentwickelt. So sind nun zwei Weichenarme zu verwenden, die sich vorne und hinten im Fahrzeug befinden, um ein besseres Kurvenfahrverhalten zu erreichen. Desweiteren hat der projektierte Rohrdurchmesser von 1,6 m auf 2,0 m zugenommen. Dies impliziert mögliche andere Fahrwegausführungen und somit andere Ausführungen der Verzweigungstechnik.

4.1.2 Andere spurgeführte Transportsysteme mit eigenständiger Fahrtrichtungsauswahl durch Fahrzeuge

Beumer autover®

Zu Verzweigungstechniken, bei denen die Fahrzeuge selbsttätig ihre Fahrtrichtung auswählen, existieren mehrere Patente. Es ist aber lediglich ein System bekannt, bei dem diese Technik in der Praxis genutzt wird.

Die Firma Beumer ist Anbieter eines Gepäcktransportsystems für Flughäfen, das Beumer autover® genannt wird. Wie auch bei CargoCap können sich die Transporteinheiten die Fahrtrichtung selbst aussuchen, indem sie ihre Weichenmodule im Vorfeld einer Verzweigung einstellen. Bedingt durch ihre Größe und ganz andere Lastverhältnisse sowie die fehlende Rohrleitungsumgebung bestehen an das autover-System allerdings andere Anforderungen als an das CargoCap-System.

4.2 Prinzipien für die Verzweigungstechnik

Die bautechnische Erstellung der Fahrrohrleitung macht den wesentlichen Anteil der Investitionskosten für ein CargoCap-System aus. Da mit zunehmendem Innendurchmesser die Baukosten ansteigen, ist es das Ziel, den Durchmesser für die Fahrrohrleitung so klein wie möglich auszuführen. Zugleich muss aber sichergestellt werden, dass die Fahrzeuge eine ausreichende Beladungshöhe aufweisen. Als Kompromisslösung wurde im Rahmen der Marktpotentialanalyse 2008 ein Innendurchmesser der Fahrrohrleitung von 2,0 m festgelegt, bei dem eine mögliche Beladungshöhe von 1,25 m (bei Verzweigungstechnik mit Lastumlagerung) garantiert werden kann. Dies ermöglicht bei einer geeigneten Gestaltung der Stückgüter (beispielsweise Verwendung von Gitterboxen) sogar eine Stapelung der Stückgüter in der Anschlusslogistik und somit eine optimale Ausnutzung des Laderaums, den Lkw und andere Transportmittel zur Verfügung stellen.

Um den Querschnitt der Fahrrohrleitung möglichst gut ausnutzen zu können, wurde von Beginn der Projekts CargoCap an ein Tiefladerprinzip projektiert. Hierbei kann der Bauraum zwischen den Schienen genutzt werden. Spurführungen, Tragkonstruktion, Teile der Stückgutfördertechnik sowie die Energieübertragungstechnik werden hierbei unterhalb der Schienenoberkante angeordnet.

Alternativ besteht die Möglichkeit, auf das Tiefladerprinzip zu verzichten. Die Komponenten Tragwerk, Spurführung und Energieversorgung befinden sich dann oberhalb der Schienenoberkante. Die mögliche Höhe der Zuladung sinkt dann jedoch ab.

Die Entscheidung, ob das Tiefladerprinzip zum Einsatz kommt oder nicht, beeinflusst den Aufbau von Fahrzeug und Strecke. So sind beispielsweise die Spurführungen anders anzuordnen. Aber auch von den auf das Fahrzeug und die Strecke wirkenden Betriebslasten her verhalten sich beide Prinzipien anders.

Die Anwendung des Tiefladerprinzips führt dazu, dass beim Durchfahren einer Verzweigung oder einer Zusammenführung das Fahrzeug nicht beidseitig durch eine Schiene getragen werden kann, sondern es zu einer Lastumlagerung kommt und das Fahrzeug einseitig durch seitliche Weichenarme getragen und geführt werden muss. Ohne Anwendung des Tiefladerprinzips hingegen haben die Weichenarme eine reine Spurführungsfunktion in der Verzweigung.

Um die Funktion der Verzweigungstechnik sicherzustellen, muss im Falle einer angewendeten Lastumlagerung das Weichenmodul das Fahrzeug aktiv zur Seite ziehen und sorgt somit für ein aktives Anheben des Fahrzeugs. Diese Funktion ist bei allen Schwerpunktlagen des Fahrzeugs sicherzustellen. Eine Absenkung des Fahrzeugs bei einer Verzweigungsdurchfahrt ist hingegen unzulässig, da es bei einem Wiederauftreffen des Fahrzeugs auf die erneut beginnende Schiene zu einem Schlag innerhalb des Fahrwerks kommen würde.

Damit eine Absenkung des Schwerpunkts vermieden wird, muss das Weichenmodul bei gegebener Federkonstante hinsichtlich Armlänge und Abstand zwischen Fahrzeug und seitlicher Führungsschiene passend voreingestellt werden. Der Abstand der Lauffläche der Führungsrollen der Weichenarme muss dabei kleiner sein als der Abstand der Lauffläche der Führungsschiene zum Fahrzeug. Zu berücksichtigen ist desweiteren die Einfederung des Weichenmoduls.

Im Fall ohne Lastumlagerung haben die Weichenarme nur eine führende Funktion. Auch in diesem Fall müssen die Weichenmodule bei Einfahrt in die Verzweigung angespannt werden, um das Fahrzeug zu führen. So muss, unabhängig vom gerade vorherrschenden Beladungszustand und unabhängig davon, ob der gerade Ast einer Verzweigung oder eine abzweigende Kurve durchfahren wird, die Spurführung stets anliegen. Desweiteren soll das Fahrzeug nicht einseitig abheben.

4.3 Quasistatische Betrachtung der Betriebslasten zur Vorauslegung

Um die Federn in den Weichenmodulen auszulegen und eine geeignete vertikale Anordnung der Weichenmodule zu ermitteln, wurde zunächst eine quasistatische Betrachtung der Betriebskräfte für den Fall mit Lastumlagerung und den Fall ohne Lastumlagerung durchgeführt.

4.3.1 Mit Lastumlagerung

Im Schwerpunkt des Fahrzeugs greift die Gewichtskraft F_G sowie bei Kurvenfahrt die Zentrifugalkraft F_z an. Hieraus resultieren in Abhängigkeit der Hebelarme nach den Gesetzmäßigkeiten der technischen Mechanik die Radaufstandskräfte $F_{Rad,i}$, die Weichenarmkräfte $F_{w,i}$ sowie die Spurführungskräfte $F_{SP,i}$. Hierzu wurden passende Werte ermittelt. Desweiteren wurde die bei Kurvenfahrt wirkende Zentrifugalkraft ermittelt

Festlegung vertikale Höhe Weichenmodule

In einem ersten Schritt wurde auf Basis der wirkenden Betriebslasten eine sinnvolle Anordnung der Weichenmodule ermittelt. Diese sind so anzuordnen, dass die Betriebslasten gering sind und außerdem genug Bauraum im Fahrrohrleitungsquerschnitt für die Verzweigungstechnik besteht.

Variation des Fahrzeugschwerpunkts

Unterschiedliche Zuladungen können den Fahrzeugschwerpunkt variieren lassen. Dieser kann sich in allen drei Richtungen verschieben.

Es ist geplant, das CargoCap-Fahrzeug für eine zulässige Zuladung von 1,5 t auszulegen, wobei dieser Wert von einer Palette alleine oder beiden zusammen erreicht werden kann. Befindet sich nur eine schwere Palette im Fahrzeug, so wird der Schwerpunkt erheblich nach vorne bzw. nach hinten verlagert. Dies wirkt sich sowohl auf die einzelnen Weichenarm- und Spurführungs- als auch auf die einzelnen Radaufstandskräfte aus, die dann ungleichverteilt sind, während die Gesamtsumme der jeweiligen Kräfte unverändert bleibt.

4.3.2 Ohne Lastumlagerung

Im Fall ohne Lastumlagerung ist sicherzustellen, dass die Spurführungen stets anliegen und eine Kraft übertragen und dass das Fahrzeug stets auf allen vier Rädern steht, unabhängig von der aktuellen Beladungssituation und somit Schwerpunktlage. Dies wird

durch die passende Voreinstellung der Federn in den Weichenmodulen bezüglich Federkonstante und Federweg sowie durch die passende vertikale Lage der Weichenmodule, bezogen auf die Schienenoberkante erreicht. Federkonstante und Federweg sind so zu wählen, dass auch unter Berücksichtigung von Toleranzen stets eine sichere Führung gewährleistet ist und zugleich die Kräfte nicht zu stark schwanken.

Die Ermittlung der auftretenden Betriebslasten erfolgt – wie auch im Falle der Lastumlagerung – auf Basis der Formeln der technischen Mechanik. Auf Basis der Schwerpunktlage sowie der Gewichtskraft und der Zentrifugalkraft werden alle Radaufstandskräfte sowie die einzelnen Weichenarm- und Spurführungskräfte berechnet.

Vorauslegung des Systems

Bei der Vorauslegung des Systems wurden die Weichenmodule zunächst bzgl. der Vertikalen mittig, d.h. 800 mm über der Schienenoberkante angeordnet und zugleich die Auswirkung der Variation der Vorspannkraft innerhalb der Weichenmodule bei Verzweigungsdurchfahrt untersucht.

Damit die Weichenmodule in jeder Betriebssituation eine Führung des Fahrzeugs sicherstellen, ist nach Festlegung der Vorspannkraft eine zweite konstruktive Maßnahme durchzuführen: eine Veränderung der vertikalen Weichenmodulanordnung.

Demnach ist es in diesem Fall günstig, die Weichenmodule möglichst tief anzuordnen.

Variation des Fahrzeugschwerpunkts

Auch im Falle mit Lastumlagerung wurde die Auswirkung der betriebsbedingten Verlagerung des Fahrzeugschwerpunktes untersucht. Dieser hat auch einen direkten Einfluss auf das Betriebsverhalten der Weichenmodule und das Fahrverhalten des Fahrzeugs innerhalb der Verzweigung.

4.3.3 Vergleich der Fälle mit Lastumlagerung und ohne Lastumlagerung

Die beiden Fälle „mit Lastumlagerung“ und „ohne Lastumlagerung“ müssen eingeordnet werden können. Neben Aspekten der Sicherheit und sonstigen Vor- und Nachteilen sollten auch die auf die Spurführungen, Weichenmodule sowie Räder auftretenden Lasten beurteilt werden. In diesem Zusammenhang wurden zwei Referenzszenarios aus den vorhergehenden Kapiteln einander gegenübergestellt.

Es fällt auf, dass die Weichenarme und Spurführungen im direkten Vergleich ein ähnliches Kraftniveau aufweisen.

Die Räder müssen in beiden Fällen die Gewichtskraft des Fahrzeugs abfangen. Bei Lastumlagerung teilt sich die Kraft zwischen zwei Rädern auf einer Fahrzeugseite auf, während ohne Lastumlagerung die Kraft durch alle vier Räder getragen wird. Allerdings kommt es dann zu einer deutlichen Ungleichverteilung zwischen beiden Fahrzeugseiten. Die von der Führungsschiene abgewandten Räder nehmen weniger Radaufstandskräfte auf.

Somit gilt die pauschale Aussage „Ohne Lastumlagerung kommt es zu kleinen Lasten“, die in vielen Diskussionen fällt, nicht.

Grundlegend bei der Ausführung ist, dass durch die Vorauslegung eine deutliche Unterscheidung zwischen den Fällen „mit Lastumlagerung“ und „ohne Lastumlagerung“ stattfindet und hierbei alle möglichen zulässigen Schwerpunktlagen berücksichtigt werden.

4.4 Ermittlung der Betriebslasten für 1:1-Fahrzeuge

Die in Kapitel 4.3 durchgeführte Betrachtung zeigt den quasistatischen Fall. Es handelt sich hierbei um die Kräfte, die im Mittel bei einer Verzweigungsdurchfahrt zu erwarten sind bzw. die auftreten, wenn das Fahrzeug innerhalb einer Verzweigung steht (vergleiche Fall „Geradeausfahrt“). Nicht berücksichtigt sind hierbei aber die unvermeidlichen dynamischen Einflüsse, die auf Weichenarme, Spurführungen und Räder wirken. Diese können mithilfe von Mehrkörpersimulationen ermittelt werden. Die Kenntnis über die statischen und dynamischen Lasten sowie deren Verläufe über die Zeit ist für eine spätere Dimensionierung der Komponenten von erheblicher Wichtigkeit, sodass diese beanspruchungsgerecht ausgelegt werden können. Es können durch den angepassten Materialeinsatz auch die Massen einiger Bauteile reduziert werden, sodass bei einem späteren Einsatz weniger Energie zur Erbringung einer Transportleistung benötigt wird.

Bei der Mehrkörpersimulation handelt es sich um ein numerisches Simulationsverfahren, bei dem Systeme mehrerer unverformbarer Körper abgebildet werden. Diese weisen Massenschwerpunkte und Trägheitsmomente auf und können sich teilweise entsprechend definierter kinematischer Bedingungen (Einschränkung durch Gelenke etc.) relativ zueinander bewegen. Desweiteren werden die Körper mit Feder-Dämpfer-Systemen miteinander verbunden und treten bei ihrer Bewegung zeitweise auch miteinander in Kontakt.

Im Falle der CargoCap-Verzweigungstechnik werden das CargoCap-Fahrzeug sowie die Strecke als ein Mehrkörpersystem abgebildet. Hierbei kann sich das aus einzelnen Körpern aufgebaute Fahrzeug entlang einer Schiene bewegen und durchfährt die Verzweigung. Die hierbei auftretenden Lasten sowie das Bewegungsverhalten werden analysiert. Zum Einsatz kommt das kommerzielle MKS-Programm VirtualLab des Anbieters LMS.

4.4.1 Einflussfaktoren Last-Zeit-Verläufe

Die Einflüsse auf die Last-Zeit-Verläufe bei Verzweigungsdurchfahrt sind vielfältig. Zu unterscheiden sind

- Betriebsbedingte Einflüsse
- Einflüsse aus Gestaltung des Fahrwegs
- Einflüsse aus Gestaltung des Fahrzeugs und
- Einflüsse aus der Festlegung der Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Fahrweg.

Zu den betriebsbedingten Einflüssen zählen die Fahrtgeschwindigkeit beim Durchfahren einer Verzweigung und auch die Fahrtrichtung (vorwärts/rückwärts), die Schwerpunktlage und das Fahrzeuggewicht.

Die dynamischen Belastungen und die dazu korrespondierende Fahrdynamik des Fahrzeugs hängt desweiteren von der Gestaltung des Fahrwegs ab. So beeinflusst beispielsweise die Geometrie der Führungsschiene, z.B. in der Ausprägung der Einlaufschräge, wie groß ein Stoß bei der Einfahrt wird. Relevant ist auch die genaue Lage der Führungsschiene der Verzweigungstechnik bezogen auf die Lage der Strecke, da diese als Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Strecke die quasistatischen Lasten festlegt.

Die konstruktive Gestaltung des Fahrzeugs beeinflusst ebenfalls Fahrdynamik und Lasten. Zu unterscheiden sind hierbei Fahrwerk, bestehend aus Rädern und Spurführung, und die Verzweigungstechnik. Bei der Aufhängung der Rollen von Weichenmodulen, Spurführungen und Rädern gibt es jeweils Feder-Dämpfer-Systeme, deren Steifigkeiten und Dämpfungskonstanten sowie deren voreingestellte Wege das Fahrverhalten festlegen. Desweiteren bestimmen die Materialien der Rollen, wie sich das Fahrzeug verhält, da je nach Vorauswahl Kontaktsteifigkeiten und Dämpfungsverhalten variieren. Darüber hinaus bestehen grundsätzlich unterschiedliche Möglichkeiten, das Fahrwerk aufzubauen.

4.4.2 MKS-Modellbildung

Im Rahmen des Projekts wurde ein Mehrkörpersimulationsmodell eines 1:1-Fahrzeug erstellt, mit dem der Fall „mit Lastumlagerung“ untersucht wird. Hiermit können die Last-Zeit-Verläufe von Weichenmodulen, Spurführungen und Rädern bei verschiedenen Beladungszuständen untersucht werden.

Bei der Modellbildung wurde zunächst ein Fahrzeug in einem 3D-CAD-Programm modelliert. Dieses besteht aus zwei Antriebsmodulen und dem dazwischen befindlichen Mittelmodul. Die Antriebsmodule enthalten das Fahrwerk (Räder und Spurführungen) sowie die Weichenmodule. Darüber hinaus werden hier Antriebsmotoren und die elektrische Energieübertragungstechnik angeordnet. Das Mittelmodul besteht aus einer Tragkonstruktion mit darauf befindlichen Kettenförderern zum Quertransport von Stückgütern sowie einem Rahmen. Allen Komponenten, deren Querschnitte überschlägig dimensioniert worden sind, wurden Materialien zugewiesen. Auf Basis der Geometrie ergeben sich dann Massen und Schwerpunkte sowie Trägheitsmomente. Das Modell bildet ein 1:1-Fahrzeug somit möglichst originalgetreu ab.

Zwischen Rädern, Spurführungen und Weichenmodulrädern einerseits und Schienen und Spurführungen andererseits werden hierzu Kontakte modelliert.

Die Modellbildung basiert hierbei auf den in der Vorauslegung getroffenen Annahmen.

Im Modell wurden die Schwerpunktlagen variiert. Im Rahmen der Modellierung mussten auch die Parameter der Feder-Dämpfer-Systeme eingestellt werden. Die Auswahl der einzustellenden Werte erfolgte iterativ. Es wurden verschiedene Annahmen für die Federkonstanten getroffen und deren Auswirkung in diversen Beladungssituationen simuliert. Schließlich wurden diejenige Parameterkombination ausgewählt, die ein zufriedenstellendes Ergebnis in allen Varianten aufweist.

4.4.3 Ergebnisse und Auswertung

Für verschiedene Betriebssituationen wurden die Last-Zeit-Verläufe der Weichenarmbelastungen, der Spurführungsbelastungen sowie der Radaufstandskräfte ausgewertet. Desweiteren wird der Abstand-Zeit-Verlauf der Räder derjenigen

Fahrzeugseite ermittelt, die abgehoben hat. Auf dieser Basis kann ermittelt werden, wie gut die Lastumlagerung funktioniert hat oder ob die Gefahr besteht, dass sich das Fahrzeug unzulässig absenkt und am Ende der Verzweigung beim Wiederaufsetzen einen Stoß erfährt.

4.4.4 Ermittlung der Betriebslasten für 1:1-Fahrzeuge bei Kurvenfahrt

Beim Durchfahren eines abzweigenden Astes einer Verzweigung verhält sich das Fahrzeug weitestgehend gleich wie bei der Durchfahrt des geraden Astes. In beiden Fällen muss das Fahrzeug sich zunächst in eine seitliche Führungsschiene einhaken. Bei Beginn der Kurve tritt zusätzlich eine Zentrifugalkraft auf, die anteilig als Zusatzkraft auf beide Weichenmodule wirkt.

Die Kurvenfahrt wurde ebenfalls in MKS abgebildet. Das Modell unterscheidet sich in zwei wesentlichen Eigenschaften: Zum einen beginnt innerhalb der Verzweigung eine Kurve, sodass die Schienen wie auch die Führungsschienen jeweils einen konstanten Radius aufweisen. Die Kreisbögen sind zueinander parallel, haben also den gleichen Mittelpunkt. Zum anderen erfordert die Kurve einen veränderten Fahrzeugantrieb. Es ist nun nicht mehr möglich, einfach eine Fahrtrichtung in eine Richtung vorzugeben, da das Fahrzeug dann mit Beginn der Kurve im Modell die Kurve verlassen würde. Umgangen wird dieses Problem, indem die Räder einen Einzelradantrieb erhalten und das Fahrzeug über die zwischen Rädern und Schienen modellierte Reibung antreiben.

Bei der Kurvenfahrt sind Varianten mit und ohne Übergangsbogen untersucht worden. Bei den Ergebnissen unterscheiden sich diese insbesondere darin, wie schnell die aus der Kurvenfahrt resultierende Zentrifugalkraft aufgebaut wird.

4.5 Ermittlung der Betriebslasten bei Verzweigungsdurchfahrt für das Modellstreckenfahrzeug

Eine direkte Validierung der Kraft-Zeit-Verläufe für das 1:1-Fahrzeug anhand durchgeführter Messungen ist aktuell noch nicht möglich, da ein 1:1-Fahrzeug noch nicht existiert. Daher wird der Umweg über das Modellstreckenfahrzeug beschritten. Bei der Verzweigungsdurchfahrt eines Modellstreckenfahrzeugs kommt es zu den gleichen Effekten wie bei einem 1:1-Fahrzeug. Der wesentliche Unterschied zwischen 1:1-Fahrzeug und Modellstreckenfahrzeug besteht im veränderten Maßstab sowie in einer anderen Gewichtverteilung, die wiederum die auftretenden Lasten beeinflussen. Somit wird zur Validierung zunächst die Verzweigungsdurchfahrt mit MKS simuliert, um nachzuweisen, dass sich dieses grundsätzlich wie ein 1:1-Fahrzeug verhält. In einem nächsten Schritt werden Versuche zur Lastermittlung durchgeführt. Die Messergebnisse sollen das MKS-Modell des Modellstreckenfahrzeugs validieren. Indirekt ist dann auch eine Validierung für die Simulation der 1:1-Fahrzeuge durchgeführt worden.

4.5.1 Mehrkörpersimulation

Modellbildung

Um die Verzweigungsdurchfahrt des Modellstreckenfahrzeugs zu simulieren, wurde auf ein bestehendes 3D-CAD-Modell zurückgegriffen und dieses unter Zuweisung der Bauteildichten bzw. von Massen in das MKS-Programm VirtualLab importiert. Um sicherzustellen, dass hierbei keine fehlerhaften Annahmen getroffen worden sind, wurde das Modellstreckenfahrzeug der Modellstrecke gewogen und dessen Masse mit derjenigen des erstellten Modells verglichen. Die Abweichung betrug ca. 1kg, was auf das Gesamtgewicht von 273 kg gesehen nur marginal ist.

In einem nächsten Schritt wurden nun die einzelnen Körper miteinander verbunden und hierbei Federn, Lagerstellen und Kontakte entsprechend der realen Situation abgebildet.

Simulation und Ergebnisse

Bei der Simulation wurden folgende Parameter variiert:

- Fahrtgeschwindigkeit des Fahrzeugs
- Federsteifigkeit der Weichenmodule
- Variation der Führungsschiene

Es wurden die Last-Zeit-Verläufe der Radaufstandskräfte und der Weichenarmkräfte sowie der Spurführungen für eine voreingestellte Federrate der Weichenmodule ermittelt und auf dieser Basis der Einfluss der Parametervariation erläutert.

4.5.2 Erweiterung der Modellstrecke und des Modellstreckenfahrzeugs

Verzweigungstechnikprüfstand

Um die Verzweigungstechnik erproben zu können und Lasten beim Durchfahren einer Verzweigung auch an der Modellstrecke messen zu können, wurde die Modellstrecke um einen Verzweigungsprüfstand erweitert. Bei diesem ist die Modellstrecke in einer Geraden auf einer Länge von 12m beidseitig mit Führungsschienen ausgestattet worden, in die die Weichenmodule der Fahrzeuge eingreifen können. Dieser

Verzweigungsprüfstand ermöglicht es, die Variante der Verzweigungstechnik „mit Lastumlagerung“ im verkleinerten Modellmaßstab nachzubilden.

Nicht schaltende Weichenmodule für ein Modellstreckenfahrzeug

Für das „kleine“ Modellstreckenfahrzeug wurde ein Weichenmodul entwickelt, das als „nicht schaltend“ ausgeführt wurde. Dieses ist so konzipiert, dass das Fahrzeug grundsätzlich auf der einen Fahrzeugseite in die seitliche Führungsschiene eingreift. Mit dem Weichenmodul können verschiedene Einflussparameter der Last-Zeit-Verläufe beim Durchfahren der Verzweigung messtechnisch erfasst werden, die dann später analysiert werden. Einflüsse haben insbesondere die Federsteifigkeit und die voreingestellte Länge des Arms. Beide Größen sind einstellbar. Bei der Steifigkeit wird dies über die Anzahl der Tellerfedern vorgenommen; bei der voreingestellten Länge über Scheibenelemente, die zwischen einem Absatz der Achse und Lagersitz eingefügt werden. Abbildung 4.1 zeigt das „kleine“ Modellstreckenfahrzeug mit nicht schaltenden Weichenmodulen innerhalb des Verzweigungsprüfstands. Dieses Fahrzeug dient in erster Linie der Durchführung von Versuchen, während das andere primär zu Demonstrationszwecken gebaut worden ist.



Abbildung 4.1: Modellstreckenfahrzeug mit nicht schaltenden Weichenmodulen innerhalb des Verzweigungsprüfstands

Die Hauptlast für die Weichenmodule stellt die Axialbelastung der Weichenmodulachsen dar. Darüber hinaus kommt es beim Einlauf in die Führungsschiene zu einem Querschlag auf die Weichenmodulachse, die sich als Biegebelastung innerhalb des Arms auswirkt und der von der Gestaltung der Einlaufschräge abhängt. Um beide Größen messtechnisch erfassen zu können, wurden an beiden Weichenarmen Messstellen eingerichtet. Hierzu wurde im Bereich der Messstellen jeweils der Querschnitt reduziert,

sodass die auftretenden Lasten eine höhere Dehnung bzw. eine größere Durchbiegung hervorrufen, wobei die Streckgrenze der Vorauslegung nach aber nicht überschritten wird. Im Bereich des reduzierten Querschnitts wurden pro Weichenarm zwei Messstellen eingerichtet und hierzu Dehnungsmessstreifen (DMS) appliziert, die als Vollbrücke verschaltet werden. Eine DMS-Kombination dient zur Erfassung der Zug-Druck-Belastung und ist jeweils auf der Ober- und Unterseite des Weichenarms angeordnet (vergleiche Abbildung 4.2), während die DMS-Vollbrücke zur Erfassung der Biegung jeweils auf den Seitenflächen aufgebracht ist.

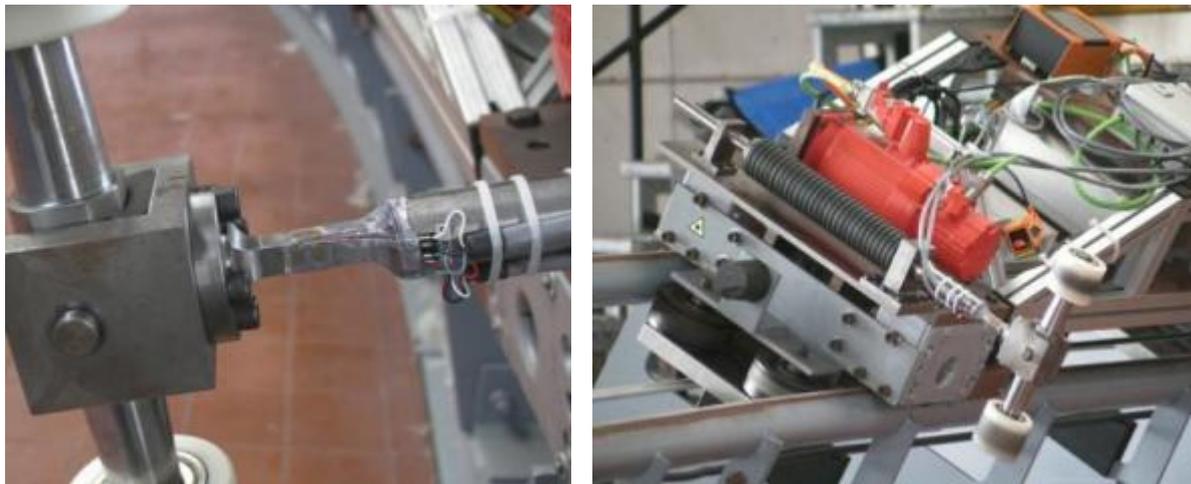


Abbildung 4.2: Messstellen am Weichenarm mit DMS für Zug-Druck-Belastung sowie Biegebelastung (links); Fahrzeug mit Weichenarm mit applizierter Messstelle (rechts)

Um die Messkette zu vervollständigen, wurden die DMS an einen mobilen, akkubetriebenen Messverstärker angeschlossen, der auf dem Fahrzeug mitfahren kann und die gemessenen Daten per Funk an eine Basisstation überträgt. Diese Basisstation ist wiederum mit einem PC verbunden, mit dem die erfassten Daten nach erfolgter Kalibrierung der DMS in Lasten umgerechnet werden können.

Grundlage für die Durchführung der Versuche war eine Umstellung der Antriebstechnik der Fahrzeuge von dem zuvor vorhandenen Master-Slave-Betrieb auf einen Doppelmastbetrieb, damit eine Lastumlagerung überhaupt möglich ist. Wenn die eine Fahrzeugseite „in der Luft“ hängt, kann diese kein Drehmoment mehr auf die Schiene übertragen. Bei dem zuvor vorhandenen Master-Slave-Betrieb führte dies zu einem „Durchdrehen“ der Räder auf der abgehobenen Seite. Deswegen musste ein elektronisches Sperrdifferential implementiert werden. Dieser Schritt erforderte eine umfangreiche Umprogrammierung der Antriebskonfiguration in der Fahrzeugsteuerung.

4.5.3 Versuchsreihen

Bei den Versuchen wurden im Wesentlichen drei Parameter variiert:

- Die Fahrtgeschwindigkeit
- Die Federsteifigkeit in den Weichenarmen
- Die Nulllage des Weichenarms

Die Nulllagen und die Federsteifigkeiten beider Weichenarme wurden jeweils gleich eingestellt, da zu erwarten ist, dass bei realen Fahrzeugen hier auch keine

unterschiedlichen Konfigurationen zwischen dem vorderen und dem hinteren Weichenarm ausgewählt werden.

Bei den Versuchsreihen zeigt sich, dass es bei der Verzweigungsdurchfahrt dynamische Effekte gibt, die bei einer Umsetzung besondere Berücksichtigung erfahren müssen. Es konnte der Hintergrund dieser Effekte geklärt werden und bereits Lösungsansätze erarbeitet werden, wie diese Effekte aufgehoben bzw. reduziert werden können.

4.6 Entwicklung eines schaltenden Weichenmoduls

Während der Projektlaufzeit wurde für das Modellstreckenfahrzeug ein schaltendes Weichenmodul entwickelt. Dieses ermöglicht es dem Fahrzeug, seine Fahrtrichtung selbsttätig auszuwählen, indem es vor der Einfahrt in den Verzweigungsprüfstand die Weichenarme voreinstellt. Ziel dieser Lösung war es, dass sie auch prinzipiell auf die 1:1-Anwendung übertragen werden kann. Zu diesem Zweck wurden die beiden Weichenmodule auch auf der Modellstrecke getestet und erste Erfahrungen gesammelt sowie möglicher Verbesserungsbedarf dokumentiert. Die Lösung ist dabei so gestaltet, dass sie grundsätzlich bei den beiden grundlegenden Varianten der CargoCap-Verzweigungstechnik – mit und ohne Lastumlagerung – zum Einsatz kommen kann.

Die Lösung basiert auf einem Patent, das am 13.05.2011 angemeldet durch die Erfinder Herr Prof. Dr.-Ing. Gerhard Wagner und Herr Dipl.-Ing. Stefan Aldejohann angemeldet worden ist und das am 15.11.2012 durch das Deutsche Patent- und Markenamt offengelegt worden ist. Es trägt die Bezeichnung „Verzweigungsvorrichtung für spurgeführte Fahrzeuge“ und trägt die Nummer DE 10 2011 101 401 A1.

Vorangegangen war der Patentierung eine intensive Beschäftigung mit möglichen Prinziplösungen für die Verzweigungstechnik. So ist es beispielsweise möglich, einen Weichenarm in Fahrzeugquerrichtung zur Voreinstellung der Fahrtrichtung verschieblich zu gestalten und ihn in der Endlage zu arretieren, um die Zugkräfte bei der Verzweigungsdurchfahrt übertragen zu können.

4.6.1 Patentierte Prinziplösung

Die im Patent verfolgte Prinziplösung sieht vor, dass „die Fahrzeuge ihre Fahrtrichtung vorauswählen, indem sie vor Beginn einer Verzweigung einen mit Spurführungselementen versehenen Arm drehen, sodass die Spurführungselemente auf der einen Seite in Kontakt mit der Führungsschiene treten, während die auf der anderen Seite befindlichen Elemente so angeordnet werden, dass es hier keinen Kontakt mit der Führungsschiene gibt.“ [Wagner_Aldejohann_2012]

Bei dem im Patent beschriebenen Weichenmodul wird der Weichenarm um 90° gedreht. An seinen Enden befindet sich jeweils eine Spurführungsachse, die jeweils um 90° zueinander versetzt angeordnet sind und jeweils über zwei Rollen verfügen. In der einen Endlage des Weichenmoduls rollen die Rollen dann auf der Führungsschiene ab, während auf der anderen Seite der Arm und die Spurführungsachse zwischen den Führungsschienen hindurchgleiten. Somit ist auch die Möglichkeit gegeben, dass bei Beginn der auseinandergehenden Spuren in einer Verzweigung die Weichenarme auf der nicht in Eingriff stehenden Seite zwischen den Spurführungen hindurchgleiten.

Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4 zeigen die Prinziplösung für das Weichenmodul in Draufsicht und Vorderansicht. Die Prinziplösung muss sicherstellen, dass der Rollendurchmesser, in Abbildung 4.4 gekennzeichnet mit D , kleiner ist als der Abstand a zwischen der oberen und unteren Schiene. Desweiteren sind hierbei Toleranzen aus Fertigung und Montage sowie betriebsbedingt unterschiedliche Schrägstellungslage des Weichenmoduls zu berücksichtigen, die sich aus variierenden Lasten ergeben können (vergleiche Abschnitte 4.3 und 4.4). Abbildung 4.5 zeigt die Draufsicht einer Verzweigung mit zwei Fahrzeugen, die durch Voreinstellung der Weichenmodule eine unterschiedliche Fahrtrichtung aufweisen.

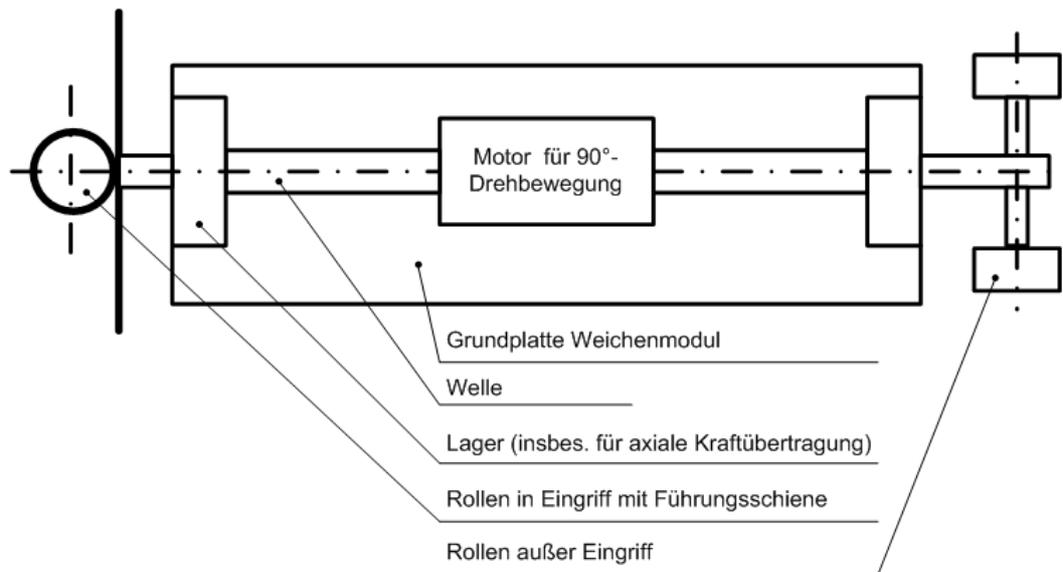


Abbildung 4.3: Figur 1 des Patents: Weichenmodul-Prinziplösung Draufsicht

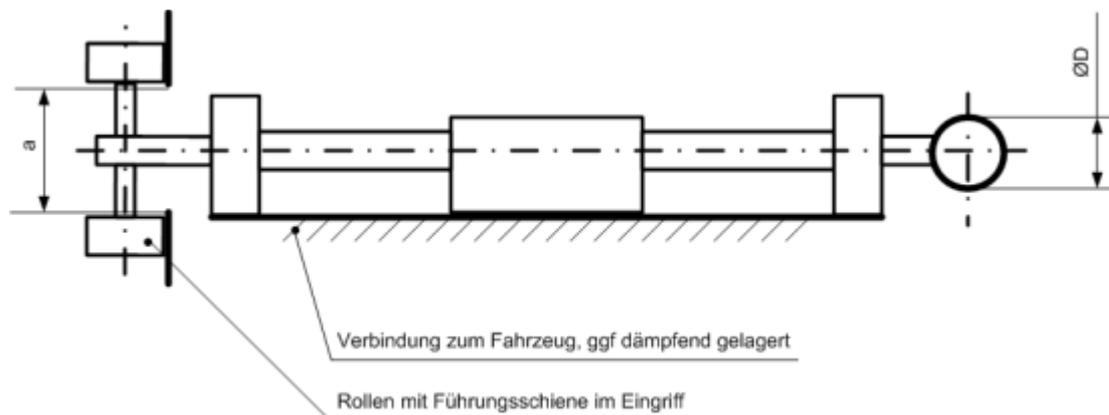


Abbildung 4.4: Figur 2 des Patents: Weichenmodul-Prinziplösung Vorderansicht



Abbildung 4.5: Fig. 3 des Patents: Zwei Fahrzeuge innerhalb Verzweigung mit unterschiedlichen Fahrtrichtungen

4.6.2 Das schaltende Weichenmodul für die Modellstrecke

Auf Basis der im Patent beschriebenen Prinziplösung wurde das Weichenmodul für das Modellstreckenfahrzeug konstruktionssystematisch entwickelt. In einem ersten Schritt wurden die Anforderungen an die Entwicklung und Konstruktion definiert. Dies sind im Wesentlichen:

- Kompatibilität zur streckenseitigen Führungsschiene, Definition der geometrischen Schnittstelle zwischen Führungsschiene und Weichenmodul
- Aufnahme der wirkenden Lasten bei Verzweigungsdurchfahrt, Abstützung der Axiallasten der Weichenarmachse und Einleitung in das Antriebsmodul
- Gefederte Aufhängung der Weichenmodulachse
- Einstellbare axiale Lage der Weichenmodulachse bzw. der daran befestigten Spurführungen
- Drehbare Lagerung der Weichenmodulachse
- Antrieb für 90°-Drehung, der in die Energieversorgung des Fahrzeugs implementiert wird
- Endanschlag für die Endlagen
- Endlagenarretierung
- Falls möglich bistabile Ausführung
- Berücksichtigung einer möglichen unterstützenden Weichenmodulbetätigung
- Dimensionierung der Komponenten
- Einbindung in ein Steuerungskonzept, Definition erforderlicher Sensorik und Aktorik

Auf dieser Basis erfolgte die konstruktive Ausgestaltung.

4.6.3 Untersuchung der Schaltdynamik

Um Erfahrungen mit dem Weichenmodul zu sammeln und Verbesserungsbedarf für die Weiterentwicklung der Konstruktion zu ermitteln, wurde eins der beiden für die Modellstrecke gefertigten Weichenmodule zunächst als Prüfstand aufgebaut. Es wurden Versuche zur Schaltdynamik durchgeführt. Die Versuche hatten folgende Zielstellung:

- Ermittlung geeigneter Positionen für die Sensorik

- Ermittlung geeigneter Schaltzeitpunkte für die Endlagenarretierung durch Hubbolzen
- Ermittlung einer geeigneten Antriebskonfiguration (Ein- und Ausschalten, aktiv Bremsen, Einstellung der Drehzahl- und Beschleunigungsrampen) über Steuerungsplatine
- Ermittlung der möglichen Schaltzeiten
- Untersuchung des Verhaltens bei Dauerlauf
- Aufzeigen des konstruktiven Verbesserungsbedarfs

Mithilfe eines an der Welle fixierten Potentiometers konnte der Drehwinkel erfasst werden. Die Ermittlung der einzelnen Lagen des Weichenmoduls erfolgte über Näherungsschalter. Zur Auswertung der Signale kam ein Messverstärker zum Einsatz. Die Signalauswertung erfolgte über ein Notebook, auf dem ein in Labview erstelltes Programm ablief, das zugleich auch die Steuerung ermöglichte.

4.6.4 Steuerungstechnische Implementierung

Um die Weichenmodule an der Modellstrecke anzusteuern, wurde für das Modellstreckenfahrzeug eine Mobil-SPS beschafft. Zwar verfügt das Fahrzeug über einen Industrie-PC, doch die Anzahl der zur Verfügung stehenden Ein- und Ausgänge ist dermaßen begrenzt, dass sie zur Abfrage der Sensorik und zum Geben von Schaltbefehlen für die einzelnen Aktoren nicht ausreichte. Diese Steuerung übernahm nun die SPS, die zugleich die Ansteuerung einer fahrzeugseitigen Verladeeinrichtung und indirekt der streckenseitigen Rollenbahn ermöglichte. Die Kommunikation zwischen fahrzeugseitigem Industrie-PC und der Mobil-SPS beschränkt sich auf die Information, dass eine Umschaltung der beiden Weichenmodule begonnen werden soll oder dass diese erfolgreich abgeschlossen worden ist.

Es ist nur ein Umschalten in bestimmten Streckenbereichen zulässig. Es muss vermieden werden, dass das Fahrzeug kurz vor Beginn einer Verzweigung (bzw. bei der Modellstrecke vor Beginn des Verzweigungsprüfstands) eine Umschaltung beginnt, die bei Erreichen der seitlichen Führungsschiene noch nicht abgeschlossen worden ist und somit zu einem Störfall führen würde. Dies wurde durch Einbindung eines entsprechenden Codes in die Fahrzeugsteuerungssoftware erreicht. Die Fahrzeuge orten sich über RFID-Tags, die entlang der Strecke angeordnet sind und es ist zugleich bekannt, wo sich die Verzweigungen innerhalb der Strecke befinden. Es wurde in der Fahrzeugsoftware festgelegt, dass unter der Voraussetzung, dass als nächstes der Tag mit der Nr. x folgt, keine Umschaltung des Weichenmoduls zulässig ist. Auf diese Weise konnte die Umschaltung der Weichenmodule vergleichsweise einfach auf zulässige Bereiche beschränkt werden.

4.6.5 Gesamtsystem und Erkenntnisse aus der Erprobung

Beide schaltenden Weichenmodule wurden in das „große“ Modellstreckenfahrzeug eingebaut, das auch über eine Verkleidung und Verladeeinheit verfügt und somit neben Forschungszwecken vielfach auch zu Demonstrationszwecken eingesetzt wird. Ein besonderes Augenmerk wurde auf das Gesamtsystemverhalten gelegt, zu dem es kommt, wenn das Modellstreckenfahrzeug den Verzweigungsprüfstand passiert. Das Gesamtsystem wird durch Abbildung 4.6 gezeigt. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse wurden dokumentiert und können auf die Erstanwendung übertragen werden.



Abbildung 4.6: Modellstreckenfahrzeug mit schaltenden Weichenmodulen und Verzweigungsprüfstand (im Hintergrund) sowie Be-/Entladung einer Modellpalette

4.7 Unterstützende Weichenmodulbetätigung

Bei der Realisierung von CargoCap kommt es beispielsweise bei Spurwechseln zu einer dichten Aufeinanderfolge von Verzweigungen und Zusammenführungen. Vor einer Zusammenführung muss das Fahrzeug keine Fahrtrichtungsauswahl treffen, da die Fahrtrichtung vorgegeben ist. Allerdings ist zum Beispiel bei einem Spurwechsel eine Umschaltung des Weichenmoduls erforderlich, damit es sich in die Führungsschiene auf der anderen Fahrzeugseite einhaken kann. Dieser Umschaltvorgang muss innerhalb eines sehr kurzen Streckenabschnitts stattfinden. (vergleiche Abbildung 4.7).

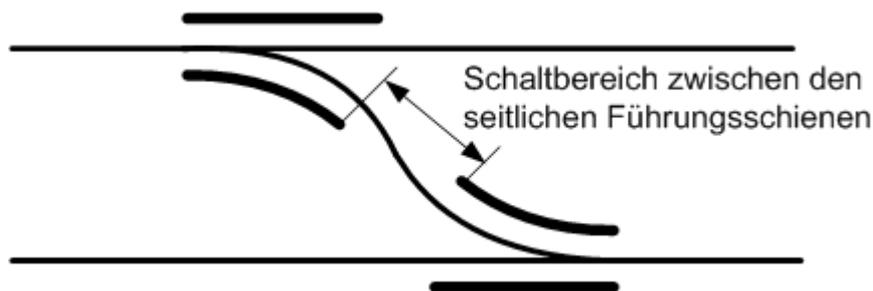


Abbildung 4.7: Notwendigkeit einer unterstützenden Weichenmodulbetätigung

Aus Gründen der Energieeffizienz und um einen ausreichenden Durchsatz der Strecke zu realisieren, sind die Abfolge aus Verzweigung und Zusammenführung mit einer konstanten Geschwindigkeit wie auf freier Strecke zu durchfahren und folgen aus baulichen Gründen sehr dicht aufeinander. Damit beim Durchfahren dieser Abfolge aus Verzweigung und Zusammenführung der Umschaltvorgang der Weichenmodule sicher erfolgt, müsste er zeitlich sehr exakt ausgelöst werden und zugleich sehr schnell ablaufen. Weil dies mit einer ausreichenden Systemsicherheit nur schwer zu erreichen ist, wird eine unterstützende Weichenmodulbetätigung benötigt, die von außen ein schnelles und sicheres Umschalten einleitet und durchführt. Erste Konzepte sehen vor, dies mit einer streckenseitigen Führung durchzuführen, durch die das Weichenmodul in diesem Fall zwangsweise umgeschaltet wird.

Ziel dieses Aufgabenpakets war es, eine streckenseitige Zwangsumschaltung konstruktionssystematisch zu entwickeln, mithilfe eines Mehrkörpersimulationsmodells virtuell zu erproben und auf dieser Basis Optimierungen durchzuführen. Anschließend war die gewählte Lösung an der Modellstrecke zu implementieren und zu erproben und daraus Rückschlüsse für einen späteren Einsatz in realen Anwendungen zu ziehen.

Für die unterstützende Weichenmodulbetätigung wurde zunächst eine Anforderungsliste erarbeitet. Auf Basis dieser wurden konstruktionssystematisch mehrere Prinziplösungen erarbeitet, von denen nach einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung die Geeignetste ausgewählt wurde. Bei dieser Variante wird an den Weichenarm eine Kulissenführung angebracht, die durch Eingriff in ein Führungselement eine Umschaltung des Weichenmoduls an einem bestimmten Ort hervorruft.

Um diese unterstützende Weichenmodulbetätigung auslegen zu können, wurden zunächst eine Simulation mit MKS durchgeführt. Hierbei wurde ein vereinfachtes Fahrzeug abgebildet, das eine Strecke entlang fährt. Das darauf befindliche Weichenmodul wurde detailliert nachgebildet.

Ergebnisse der Simulation und Auswertung

Die Durchführung der Simulation erfolgte in mehreren Schritten, es wird eine kontinuierliche Verbesserung des Modells durchgeführt und somit zunehmend realistischere Annahmen getroffen.

Im ersten Schritt wurde die Achse der Rolle, die das Weichenmodul durch die Schienenkontur führt noch starr angebunden. Desweiteren wies die Führungsschiene noch nicht die endgültige Kontur auf. Hierbei zeigte sich, dass die Führungsrolle in dem Bereich, wo beidseitig eine Schiene vorhanden ist, zwischen beiden Seiten hin- und her pendelte, ständig dabei die Drehrichtung ändert. Zugleich waren damit hohe Kraftspitzen verbunden, die bei einem realen System zu einer Zerstörung der Komponenten geführt hätten. Diese ließen sich aber durch die Einbringung eines Feder-Dämpfer-Systems reduzieren.

In weiteren Schritten wurde die Geometrie der Führungsschiene optimiert und ein Feder-Dämpfer-System eingebracht, sodass die beim Umschalten wirkenden Lasten realistische Werte annehmen.

Ein wesentliches Ziel bei der unterstützenden Weichenmodulbetätigung ist es, dass eine Umschaltung um möglichst exakt 90° realisiert wird. Somit wurde auch die Winkeldrehung des Weichenarms aufgezeichnet und analysiert.

Die Simulationen zeigten, dass durch die Implementierung einer unterstützenden Weichenmodulbetätigung in die CargoCap-Fahrzeuge grundsätzlich eine örtlich sehr genaue Umschaltung vorgenommen werden kann, der Weichenarm um ziemlich genau 90° gedreht wird und somit eine Reduzierung der Abstände zwischen Verzweigung und Zusammenführung möglich wird.

Erprobung durch Versuche an der Modellstrecke

Um die Simulationsergebnisse zu bestätigen und weitere Erkenntnisse über das Systemverhalten zu gewinnen, wurde die unterstützende Weichenmodulbetätigung auch in die Modellstrecke implementiert. Hierzu wurde innerhalb des Verzweigungsprüfstands eine Auslöseschiene eingebaut. Das System wurde dabei genau konstruktiv so aufgebaut, wie die MKS-Simulation der unterstützenden Weichenmodulbetätigung ergeben hat. In das Weichenmodul wurde ein Arm integriert, an dessen Ende sich eine Rolle befindet. Die Achse ist innerhalb eines Feder-Dämpfer-Systems gelagert und somit entgegen einer Federkraft verschieblich. Um die Drehbewegung innerhalb des Verzweigungsprüfstands durchführen zu können, mussten die Spurführungen an den Weichenmodulen für die Dauer dieser Versuchsreihe demontiert werden.

Erkenntnisse bezüglich einer Umsetzung in 1:1-Systemen

Die Simulationen wie auch die praktischen Versuche an der Modellstrecke haben gezeigt, dass die unterstützende Weichenmodulbetätigung grundsätzlich funktioniert und somit der Abstand zwischen Verzweigungen und Zusammenführungen reduziert werden kann, weil eine streckenseitige Einheit die Umschaltung der Weichenmodule örtlich sehr genau vornimmt. Damit ein solches System sicher funktioniert, sind allerdings mehrere Punkte zu beachten. Diese wurden dokumentiert und können somit in die Entwicklung späterer Anwendungen einfließen.

5 Projektteil „Fahrzeugsteuerung an Streckenzusammenführungen“

Das vorliegende Kapitel beschreibt den Projektteil „Methodische Betrachtung der Fahrverbandbildung im Umfeld von Zusammenführungen“. Der Projektantrag aus dem Juli 2010 umfasst in diesem Zusammenhang die Arbeitspakete „Optimierung der Ortung“, „Konzeption der Verbandsbildung an Zusammenführungen für CargoCap“, „Ausbau der Abstandsregelung“, „Ausbau des fahrdynamischen Ersatzmodells“ und „Implementierung der Verbandsbildungsstrategie“.

Der Fokus dieser Arbeitspakete liegt in weiten Bereichen auf der Fahrzeugsoftware. Aus diesem Grund wird zunächst der Aufbau der Hardware und der Software des CargoCap-Systems beschrieben (Kapitel 5.1). Zu unterscheiden ist hierbei zwischen dem Fahrzeug selbst, das über einen embedded Industrie-PC verfügt, auf dem eine am Lehrstuhl entwickelte Fahrzeugfirmware zur Steuerung installiert ist; simulierten Fahrzeugen, um beispielsweise die Abstandsregelung und die Zusammenführungsregelung erproben zu können; und dem Leitstand, den eine ebenfalls am Lehrstuhl entwickelte Software ausmacht. Teile dieser Software waren bereits vor Projektbeginn entwickelt, diese wurden aber während der Forschungsarbeiten deutlich weiterentwickelt und werden hier beschrieben, um ein Gesamtsystemverständnis hervorzurufen.

Kapitel 5.2 greift die zuvor bereits beschriebene Ortung durch RFID-Technik auf und schildert die Optimierungen, die im Rahmen des Projekts durchgeführt worden sind. Der Abschnitt 5.3 beschreibt dann den Sicherheitsmechanismus Watchdog, der für eine sicher funktionierende Abstandsregelung erforderlich ist.

Versuche zur Erprobung der Verzweigungstechnik mit Weichenmodulen (vergleiche Kapitel 4.4.4) machten eine Anpassung der Software zur Ansteuerung der Fahrantriebe erforderlich, deren Frequenzumrichter auch neu parametrisiert werden mussten. Diese Änderungen beschreibt Abschnitt 5.4.

Um die Versuche zur zumindest virtuellen Erprobung der Zusammenführungsalgorithmen durchführen zu können, ist eine Erweiterung des Streckennetzes im Leitstand vonnöten. In diesem Zusammenhang entstand der Wunsch, einen Streckeneditor zu entwickeln, in dem beliebige Streckennetze und anfahrbare Positionen abgebildet werden können. Desweiteren erfolgte im Rahmen dieser Arbeit eine systematische Betrachtung, wie Routen softwaretechnisch berechnet werden, um in einem Streckennetz mit dem kürzestmöglichen Weg an das Ziel zu gelangen (Kapitel 5.6). Diese Softwarekomponente kann in die Leitstandssoftware implementiert werden, um Fahraufträge inklusive Routen an die Fahrzeuge zu übertragen, und wurde innerhalb virtueller Streckennetze ausprobiert. Für die Erprobung der Software und für die späteren Versuche zur Erprobung der Abstandsregelung war auch eine Weiterentwicklung der Fahrzeugsimulatorsoftware erforderlich (Kapitel 5.7).

Kapitel 5.8 beschreibt die Zielsetzungen der Koordination der Fahrzeugbewegungen bei Abstandsregelung und Zusammenführungsregelung und greift die Simulationen zu dieser Thematik auf, die [Hölscher2012] im Rahmen seiner im Projekt CargoCap erstellten Dissertation beschreibt. Kapitel 5.9 beschreibt die in der Verkehrsflussregelung verwendeten Regelungsalgorithmen und bewertet diese bezüglich ihrer Eignung bei CargoCap, Kapitel 5.10 führt verifiziert die Regelungen für CargoCap. Bestandteil hiervon

sind auch Hardware-in-the-loop-Tests, mit denen die Zusammenführungsregelung an der Modellstrecke erprobt wurde und in einem realen Fahrzeugverhalten getestet wurde.

5.1 Aufbau der Hardware und Software

5.1.1 Gesamtsystem und Hardware

In Kapitel 3.3 wurde bereits ein Überblick über den technischen Aufbau des CargoCap-Systems gegeben. Im folgenden Abschnitt wird die Hardware und Software zur Steuerung der Fahrzeuge detailliert beschrieben.

Die Steuerung der Fahrzeuge erfolgt über den jeweils mitgeführten Industrie-PC, auf dem die am Lehrstuhl programmierte und im Rahmen dieses Projekts weiterentwickelte Fahrzeugfirmware installiert ist. Der Fahrzeugrechner kommuniziert mit den anderen Fahrzeugen in der näheren Umgebung über ein W-LAN-Netzwerk. Darüber hinaus besteht eine Kommunikation mit der übergeordneten Leitstandsebene. Ausgetauscht werden in kurzen Abständen insbesondere die Fahrzeugzustandsdaten (Aufenthaltsort des Fahrzeugs, aktuelle Geschwindigkeit und aktuelle Beschleunigung).

Der Fahrzeugrechner ist in den sogenannten PHC integriert, wobei es sich um einen Kompaktschaltschrank handelt, der neben dem Industrie-PC (IPC) die Frequenzumrichter, Netzteile und ein Modem enthält. Die Energieeinspeisung erfolgt von außen über das berührungslose System Movitrans. Der hochfrequente Strom wird zunächst gleichgerichtet und befindet sich in einem Zwischenkreis. Von diesem aus werden sowohl ein Netzteil, das weitere Komponenten mit 24V Gleichspannung versorgen kann, als auch die Frequenzumrichter (FU) mit elektrischer Energie versorgt. Diese sind mit dem Industrie-PC über CAN-Bus verbunden und bereiten die elektrische Spannung und Frequenz entsprechend der durch den IPC vorgegebenen Sollwerte für die Antriebsmotoren auf. Zugleich wird der Drehwinkel der Motoren kontinuierlich über einen Resolver erfasst und diese Information über die Frequenzumrichter an den Industrie-PC rückgemeldet. Wenn die Fahrzeuge bremsen, wechselt der Motor in einen generatorischen Betrieb. Die rückgewonnene Energie wird beim Modellstreckenfahrzeug in einem Widerstand in thermische Energie gewandelt, bei einer späteren Anwendung ist aber eine Rekuperation durch Zwischenspeicherung dieser Energie und anschließender erneuter Nutzung geplant. Der IPC ist mit einem RFID-Reader verbunden. Dieser wertet die an der RFID-Antenne anliegende Information aus und wandelt die empfangene Information in einen maschinenlesbaren Code um, aus dem die Fahrzeugfirmware auf den Aufenthaltsort des Fahrzeugs zurückschließen kann.

Desweiteren kommuniziert der IPC über digitale Ein- und Ausgänge (I/O's) mit den Weichenmodulen sowie den fahrzeugseitigen Stückgutförderern. Im Falle der Modellstrecke ist eine mobile, durch das Fahrzeug mitgeführte SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) zwischengeschaltet, da die Anzahl der I/O's des PHC beschränkt ist und somit Teile der Komponentensteuerung ausgelagert werden müssen. Die Spannungsversorgung erfolgt hier über den 24V-Anschluss, während bei einer späteren Anwendung jedoch insbesondere die Fördereinheit eine leistungstärkere Spannungsversorgung benötigen wird. Diese SPS kommuniziert darüber hinaus im Stationsbereich mit einer weiteren Steuerungseinheit, die die stationäre Fördertechnik steuert. Im Falle der Modellstrecke kommt hier eine optische

Kommunikationseinrichtung zum Einsatz, die die Informationen bezüglich der erfolgten Fahrzeugpositionierung und des Austausches der Ware über Infrarot austauschen.

Darüber hinaus sind an den PHC Laserdistanzsensoren angeschlossen. So tastet sich das Fahrzeug bei einer Positionierungsfahrt langsam an die Zielposition heran und stoppt bei der Detektion einer streckenseitigen Marke. Für spätere Fahrzeuge im Realmaßstab sind darüber hinaus weitere Laserdistanzsensoren vorgesehen, die als Redundanzsystem einen Fahrzeughalt bei Unterschreiten eines Mindestabstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug einleiten sollen. Bei der Modellstrecke konnte dieses System aufgrund der Streckengeometrie (überhöhte Kurven und enge Streckenradien) bislang nicht eingesetzt werden.

5.1.2 Fahrzeugfirmware

Die auf dem Industrie-PC aufgespielte und in C programmierte Fahrzeugfirmware besteht beim Modellstreckenfahrzeug aus folgenden Bestandteilen und würde bei 1:1-Fahrzeugen in einer ähnlichen Form realisiert:

- Position.c: Hauptprogramm
- Globalheader.h (Festlegen Datentypen und Verriegelungseinstellung)
- Programm zur Geschwindigkeitssollwertberechnung
- Programm zum Auswerten Kommandopakete vom Leitstand
- Programm zur Kommunikation mit Frequenzumrichtern der Hauptantriebe
- Programm zur Berechnung von Entfernungen und Geschwindigkeiten für Verbandfahrt
- Programm zur Fehlerermittlung (gibt bei Bedarf definierte Fehlermeldungen an die Leitstandskonsole)
- Programm zur Kommunikation mit externen Komponenten über I/O-Ports
- Programm zum Zugriff auf den RFID-Reader
- Programm zur Analyse der Zustandsdaten anderer Fahrzeuge
- Programm zur Routenabspeicherung

5.1.3 Leitstandssoftware

Zur Steuerung der Modellstrecke wurde eine Leitstandssoftware entwickelt, die in C# programmiert und im Rahmen dieses Projekts kontinuierlich erweitert worden ist. Hierbei handelt es sich um eine grafische Benutzeroberfläche (GUI), die die Modellstrecke visuell darstellt und entlang dieser sich visualisiert die CargoCap-Fahrzeuge bewegen können. Somit wird im Leitstand visualisiert, wo sich gerade die Fahrzeuge gerade auf der Strecke befinden. Im Rahmen des Projekts wurde als Ergänzung hierzu ein Streckeneditor erstellt, mit dem auch beliebige Streckennetze in der Leitstandssoftware abgebildet werden können (vergleiche Kapitel 5.5). Diese Erweiterungsmöglichkeit war notwendig, um Hardware-in-the-loop-Tests der Zusammenführungsregelung testen zu können. (vergleiche Kapitel 5.10.2).

Neben der Visualisierung wird in einem Fenster die Fahrzeug-ID, die aktuelle IP-Adresse, die Position bezogen auf den letzten Tag, die Nummer des letzten Tags und des erwarteten nächsten Tags sowie die aktuelle Fahrtgeschwindigkeit angezeigt.

Der Leitstand enthält auch eine Steuerungskomponente. In dieser können zunächst die Fahrzeuge ausgewählt werden, die eine eindeutige Fahrzeug-ID und eine damit verknüpfte IP im Streckennetzwerk besitzen. Desweiteren kann zwischen Sollwertfahrt

(Vorgabe einer Fahrtrichtung und einer Fahrtgeschwindigkeit) und einer Positionsanfahrt ausgewählt werden. Im Falle der Positionsanfahrt hält das Fahrzeug an der streckenseitigen Rollenbahn an. An dieser kann das Fahrzeug, das mit entsprechender Fördertechnik ausgestattet worden ist, seine Palette aus- und einladen. So wird der Be- und Entladungsprozess gezeigt und über den Leitstand ausgelöst. Hierzu wird vom Leitstandsrechner über das Netzwerk ein Datenpaket an den Fahrzeugrechner gesendet, der über die I/O's die fahrzeugseitige SPS anspricht. Diese Weiterentwicklung des Leitstands wurde während der Projektlaufzeit durchgeführt.

Ein weiteres Feature, um das der Leitstand erweitert worden ist, ist das Umschalten der Weichenmodule, das über den Leitstand herbeigeführt werden kann. Der Leitstand sendet ein Datenpaket an das Fahrzeug, der Fahrzeugrechner schaltet dann über die I/O's und die SPS die Weichenmodule um, sofern sich das Fahrzeug in einem für den Umschaltvorgang zugelassenen Bereich befindet.

In der erweiterten Version des Leitstands kann dieser auch andere Streckennetze steuern, die mit dem Streckeneditor erstellt werden. In dieser Variante können Routen ausgewählt werden bzw. verschiedene anzufahrende Objekte, die sich auf der Streckenkarte befinden.

Grundlage des Leitstands ist eine Datenstruktur, die auch bei dem Streckeneditor Verwendung findet.

5.1.4 Fahrzeugsimulator

Bereits um die Abstandsregelung zu testen, wurde eine Fahrzeugsimulatorsoftware entwickelt. Diese bildet das Verhalten realer Fahrzeuge in einem Streckennetz ab und ermöglicht es so, das Softwareverhalten zu testen, bevor die Software reale Fahrzeuge steuert und bei einem noch vorhandenen Fehlverhalten Schäden hervorruft. Hierzu bekommen die virtuellen Fahrzeuge eine IP und können über den Leitstand aufgerufen und gesteuert werden. Sie kommunizieren mit den realen Fahrzeugen, sodass beispielsweise ein reales Fahrzeuges, das hinter einem virtuellen Fahrzeug abstandsgeregelt hinterherfährt, bei Verzögerung des virtuellen Fahrzeugs ebenfalls eine Bremsung durchführt.

Da im Rahmen der Zusammenführungsregelung eine deutliche Weiterentwicklung dieser Software durchgeführt worden ist, wird diese Software im Kapitel 5.7 im Kontext mit den anderen durchgeführten Arbeitspaketen beschrieben.

5.2 Ortung der Fahrzeuge mit RFID und Optimierung

Im Rahmen der technischen Darstellung (vergleiche Kapitel 3.3) wurde bereits erläutert, dass bei CargoCap ein RFID-System verwendet wird, um die Position zu referenzieren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es infolge von Schlupf zwischen Rad und Schiene zu akumulativen Abweichungen zwischen der wirklichen und der gemessenen Position kommt, der mit der Zeit zunehmen würde. Aus diesem Grund wird ein RFID-System zur Ermittlung der exakten Position eingesetzt. Dieses System hat jedoch auch Messungenauigkeiten, die stochastisch verteilt sind. (vergleiche Abbildung 5.1) Das RFID-System wurde bereits vor Beginn der Projektlaufzeit auf der Modellstrecke implementiert. Während der Projektlaufzeit wurde dann ein Filter in die

Fahrzeugsoftware eingefügt, der die Abweichungen beider Sensorsysteme gegenseitig kompensieren kann.

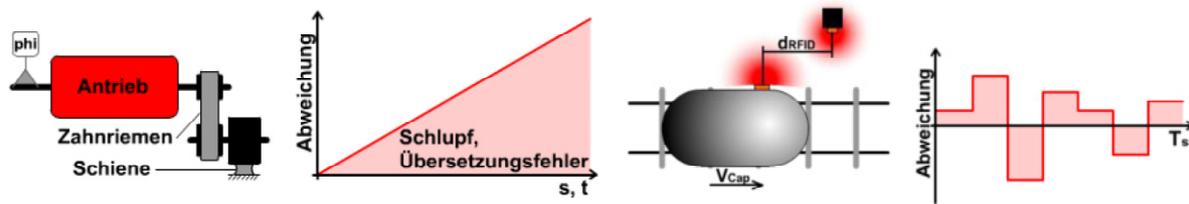


Abbildung 5.1: Abweichungen bei Positionsbestimmung durch Drehgeber (links) und RFID-Ortungssystem (rechts)

5.3 Sicherheitsmechanismus Watchdog

Die Rechner, von denen aus die Fahrzeuge über die Fahrzeugfirmware gesteuert werden, können ausfallen. In diesem Fall bricht der Netzwerkverkehr zwischen dem entsprechenden Fahrzeug und seiner Umgebung zusammen, und aufgrund der fehlenden Fahrzeugzustandsinformationen des betreffenden Fahrzeugs haben die anderen Fahrzeuge keine Aussage mehr darüber, wo sich das ausgefallene Fahrzeug befindet. Aus Sicherheitsgründen sollten bei einem solchen Fall zumindest alle Fahrzeuge, die sich hinter dem ausgefallenen Fahrzeug befinden, gezielt angehalten werden.

Softwaretechnisch kann dies mithilfe eines sogenannten Watchdogs gelöst werden. Hierbei handelt es sich um eine Komponente, die die Funktion von anderen Komponenten überwacht. Wenn innerhalb einer bestimmten Zeitspanne kein neues Signal vorliegt, löst die Software eine Reaktion aus, um das System in einen sicheren Zustand zu überführen.

Ein solcher Watchdog kommt auch bei CargoCap zum Einsatz. In die Fahrzeugfirmware wird ein entsprechendes Softwaremodul integriert, das überwacht, ob von allen Fahrzeugen in der Umgebung, von denen Netzwerkpakete zu erwarten sind, diese auch in regelmäßigen Abständen eingehen. Bleiben nun die entsprechenden Fahrzeugzustandsdaten aus, so geht das System gezielt in einen softwaretechnischen Nothalt. Der Watchdog leitet einen Systemhalt ein, die hinter dem ausgefallenen Fahrzeug befindlichen Fahrzeuge werden gezielt angehalten. Wenn die Fahrzeuge stehen, wird nun versucht, den Rechner des ausgefallenen Fahrzeugs neu zu starten und das System wieder in Betrieb zu nehmen.

Bei der Modellstrecke heißt dieses System auch „gegenseitige Verriegelung“. Diese wird eingeschaltet, wenn beide Fahrzeuge auf der Modellstrecke fahren, und deaktiviert, wenn ein Fahrzeug von der Strecke hinuntergenommen wird. Ist die gegenseitige Verriegelung aktiviert und es befindet sich nur ein Fahrzeug auf der Strecke, so kann dieses nicht fahren, weil ihm die Netzwerkpakete des erwarteten anderen Fahrzeuges fehlen.

Bei 1:1-Systemen sind weitere Sicherheitseinrichtungen vorgesehen.

5.4 Anpassung der Antriebstechnik

Beim Durchfahren einer Strecke allgemein und auch der Modellstrecke gibt es drei verschiedene Zustände, die durch die Gestaltung der Antriebstechnik zu berücksichtigen sind:

- Fahrt durch eine Gerade.
- Fahrt durch eine Kurve
- Fahrt durch eine Verzweigung

Diese Zustände sind bei der Gestaltung der Antriebstechnik zu berücksichtigen.

Bei den CargoCap-Fahrzeugen werden alle vier Räder angetrieben. Bei den Fahrzeugen im Maßstab 1:1 ist angedacht, alle vier Räder einzeln direkt anzutreiben. Bei den Versuchsfahrzeugen auf der Modellstrecke sind zwei Antriebsmotoren vorhanden, von denen der eine die Räder auf der rechten Fahrzeugseite antreibt, und der andere die Räder auf der linken Fahrzeugseite.

Die Antriebstechnik von CargoCap muss zwei grundlegende Funktionen aufweisen. Dies ist zum einen das Differentialverhalten zwischen den angetriebenen Rädern auf der linken und auf der rechten Fahrzeugseite, um die unterschiedlichen Drehzahlen bei Kurvendurchfahrt auszugleichen. Zum anderen wird für die Durchfahrt einer Verzweigung oder einer Zusammenführung ein Differentialsperrverhalten benötigt, weil das Fahrzeug im Falle einer Lastumlagerung einseitig abhebt und sein Antriebsmoment auf der abgehobenen Fahrzeugseite nicht mehr auf die Schiene übertragen kann.

Vor Einbau der Verzweigungstechnik auf der Modellstrecke waren die Umrichter in einer Master-Slave-Konfiguration parametrisiert. Hierbei wird dem Master-Umrichter durch den auf dem Fahrzeug mitgeführten Industrie-PC eine Sollzahl übergeben. Der Master ermittelt das auf die Schiene übertragene Drehmoment und gibt diesen Wert als Sollwert an den Slave-Umrichter weiter. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die Räder beider Fahrzeugseiten mit einem gleich großen Drehmoment angetrieben werden und bei Kurvenfahrt unterschiedliche Drehzahlen aufweisen können.

Die Master-Slave-Topologie ist jedoch ungeeignet für das Durchfahren von Verzweigungen und Zusammenführungen, da hierbei eine Fahrzeugseite den Kontakt zur Schiene verliert und kein Drehmoment auf die Schiene übertragen kann.

Im Rahmen des bearbeiteten Projektes wurde eine aufwändige Lösung entwickelt, die in die Fahrzeugsoftware implementiert und anschließend parametrisiert wurde. Sie vermeidet ein Fehlverhalten der Antriebe und stellt mit einem elektronischen Sperrdifferential sicher, dass in einer Verzweigung die Antriebe beide innerhalb einer gewissen Toleranz eine ähnliche Drehzahl aufweisen. Zugleich sind Kurven und Geraden durchfahrbar.

5.5 Streckeneditor

Im Streckeneditor kann neben dem Streckennetz die räumliche Lage von Stationen, Verzweigungen sowie RFID-Tags zur Ortsbestimmung vorgegeben werden.

Dazu wird eine gemeinsame Datenbasis, bestehend aus XML-Dateien¹ und einer daraus resultierenden Datenstruktur, von Streckeneditor und Leitstand-Software verwendet.

Der Streckeneditor ist als visueller Editor ausgelegt, in dem der Anwender viele der Eingaben und Änderungen per Mauseingabe vollziehen kann. Hierzu kann das Streckennetz inklusive der zuvor erwähnten Erweiterungen visuell editiert werden. Änderungen an Elementen des Streckennetzes können sowohl visuell in grober Form als auch textuell und somit wesentlich genauer erfolgen.

Die visuelle Editierbarkeit der einzelnen Streckenelemente führt in unterschiedlichem Maße zu aufwendigen mathematischen Berechnungen oder Aktualisierungen der Datenstruktur. Daher wurde bei der Programmierung des Streckeneditors von Anfang an auf mögliche Optimierungsoptionen hinsichtlich der Performance geachtet.

Neben der Erzeugung neuer Streckennetze ist auch das Laden vorhandener Daten und Speichern in eine konsistente Datenstruktur ein wichtiger Aspekt bei einer sinnvollen Verwendung des Programms.

Nicht nur das automatische Generieren des visuellen Modells aus einer XML-Datei heraus soll ohne Fehler erfolgen. Auch und vor allem muss das im Streckeneditor Routenberechnung durch den Leitstand modellierte Streckennetz den Regeln eines als valide definierten Streckennetzes folgen. Diese Aufgabe übernimmt eine entwickelte Validierung.

Ein weiteres Feature ist die automatische Datensicherung, die im Fehlerfall – extern oder durch das Programm verursacht – für eine Rekonstruktion der vermeintlich verlorenen Daten sorgt und bei Programmstart wiederhergestellt werden kann.

Abbildung 5.2 zeigt, wie der Streckeneditor in Zusammenhang mit den anderen Softwarekomponenten steht und sich somit in das Gesamtsoftwarekonzept eingliedert: Die per Streckeneditor erstellten Strecken inklusive Abschnitten und Streckenobjekten werden in eine XML-Datei konvertiert, die wiederum in dem Leitstand eingelesen werden kann. Der Leitstand ist die Bedienoberfläche zum Ansteuern der Fahrzeuge, die als reale Fahrzeuge über eine Fahrzeugfirmware zur Hardwareansteuerung verfügen oder als virtuelle Fahrzeuge durch einen Fahrzeugsimulator abgebildet werden. In beiden Fällen kommuniziert der Leitstand über UDP-Netzwerkpakete mit den Fahrzeugen. [Schmitz2013]

¹ XML: Extensible Markup Language, Standard für plattform- und implementationsunabhängigen Datenaustausch zwischen verschiedenen Computersystemen

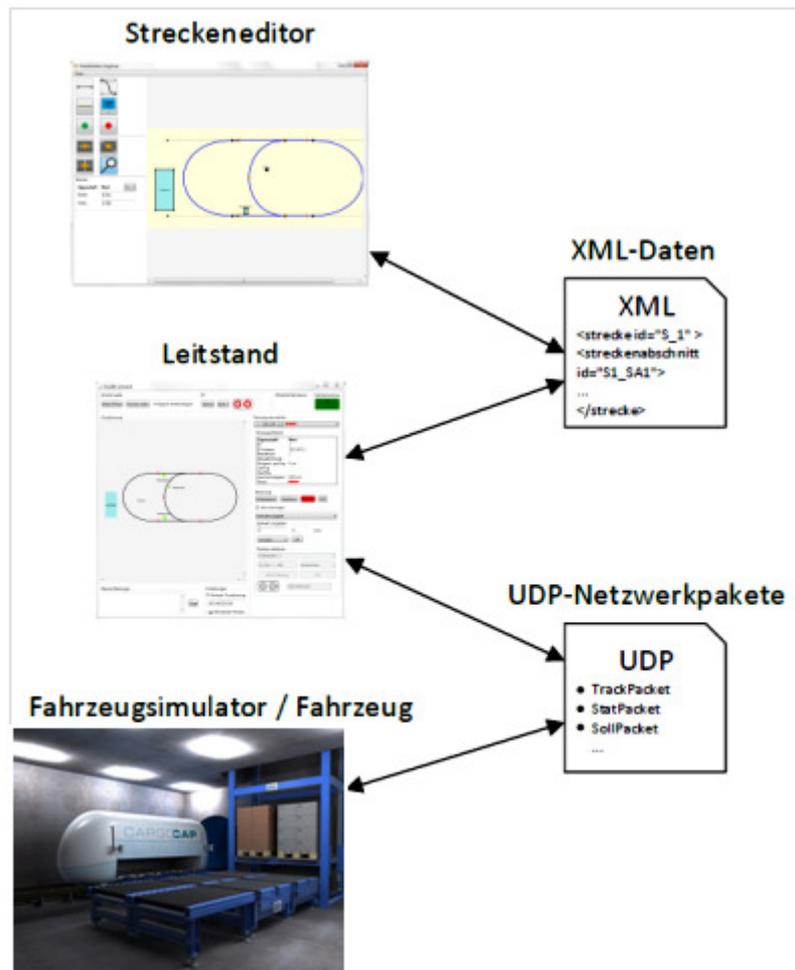


Abbildung 5.2: Zusammenhang der Softwarekomponenten Streckeneditor, Leitstand und Fahrzeugsimulator/Fahrzeugfirmware [Schmitz2013]

5.6 Routenberechnung durch den Leitstand

Die Aufgabe der Leitstand-Software besteht unter anderem auch darin, anhand der aktuellen Position der einzelnen Fahrzeuge eine Route zu erzeugen, die entweder auf Grundlage einer Zielposition oder der Vorgabe eines Sollwerts berechnet wird. Dabei sind unterschiedliche Algorithmen zur Routenberechnung notwendig. Bei der Positionsanfahrt ist ein klarer Zielpunkt für das Fahrzeug definiert. Diese Zielposition ist bei der Vorgabe eines Sollwertes nicht gegeben. Letztlich entspricht die Sollwertvorgabe einem manuellen Eingriff in den Ablauf der eigentlich automatisch gesteuerten Fahrweise der Fahrzeuge.

Vor Bearbeitung dieses Projekts existierte keinerlei Schnittstelle zwischen Leitstand-Software und Fahrzeug-Software, mit der die vorhandenen Streckendaten aus der Datenstruktur genutzt werden konnten. Stattdessen wurde aus bestehenden Abständen der RFID-Tags an der Modellstrecke, sowie deren Verlauf, ein Streckenmodell entwickelt. Auf Grund der verhältnismäßig einfachen Komplexität wurden die Streckendaten in der Fahrzeug-Software fest in den Quellcode integriert. Bei einem Befehl an das Fahrzeug konnte die Leitstand-Software voraussetzen, dass das Fahrzeug das gesamte Streckennetz bzw. jegliche Route in diesem Netz kennt. Mit Hilfe der Streckeneditor-Software sind jedoch wesentlich komplexere Streckennetze generierbar, sodass hierfür ein neues Konzept entworfen werden musste, das auf eine dynamische Erzeugung von Routendaten setzt. Auf diese Weise muss das Fahrzeug nur noch einen Ausschnitt des Streckennetzes kennen. In Hinblick auf die begrenzten Speicher- und Leistungs-Ressourcen der Embedded-Industrie-PC-Hardware wäre eine statische Lösung ab einem gewissen Umfang nicht mehr umzusetzen. Mit der statischen Lösung ist gemeint, dass die möglichen Routen des Streckennetzes auf dem Fahrzeug gespeichert sind. Bisher wurde das gesamte Streckennetz der Modellstrecke in Form zweier Routen auf dem Fahrzeug gespeichert. Bei einem derart simplen Streckennetz bestehend aus zwei zusammenhängenden Kreisen ist eine solche Lösung noch praktikabel. Mit Hilfe des entwickelten Streckeneditors ist es jedoch möglich, wesentlich komplexere Streckennetze zu entwerfen. Während der Erstellung des Streckeneditors, der Routenberechnung durch den Leitstand und der Durchführung der HiL-Versuche zur Erprobung des Zusammenführungsalgorithmus sollten die gut funktionierenden bestehenden Abstandsalgorithmen in der Firmware der Modellstreckenfahrzeuge möglichst nicht mehr verändert werden. Das dahinter stehende Datenkonstrukt – die TrackDB – basiert jedoch darauf, dass einzelne Routen im Fahrzeug in Form einer bestimmten Abfolge von RFID-Tags vorliegen. Eine vollumfängliche Speicherung aller möglichen Routen in einem komplexen System ist auf diese Weise jedoch nicht umsetzbar, da viel zu viele mögliche Routen in dem entsprechenden Streckennetz vorstellbar wären.

Da folglich nur in der Leitstand-Software das gesamte Streckennetz bekannt ist, bietet es sich daher an, in dieser Software die Routenberechnung zu implementieren. Auf diese Weise ergibt sich außerdem der Vorteil, dass der Embedded-Industrie-PC auf den Fahrzeugen während der Fahrt nicht mit komplexeren Routenberechnungen belastet und dadurch die Abstandsregelung nicht negativ beeinflusst wird. Da die Routenberechnung im Normalfall nur zu Beginn einer Fahrt durchgeführt werden muss, kann diese vor Beginn der Fahrt zusammen mit dem Fahrauftrag an das Fahrzeug übertragen werden. Eine dynamische Anpassung der Route während der Fahrt ist auf demselben Weg bei

Bedarf auch möglich. So kann sich der Fahrzeugrechner komplett auf die sicherheitsrelevante Fahrtregelung konzentrieren.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde zunächst ein Konzept erarbeitet, mit dem die Routenberechnung von der späteren Datenerzeugung getrennt wird. Dank dieses Konzepts kann später leicht ein Routenberechnungs-Algorithmus gegen einen anderen ausgetauscht werden. Gerade in Hinblick auf die spätere mögliche Verwendung eventueller Verkehrsdaten in den einzelnen Streckenabschnitten, bietet diese Lösung große Flexibilität.

Um den unterschiedlichen Anforderungen bei der Routenberechnung gerecht zu werden, wurde zunächst das Vorgehen für die Berechnung der Routendaten im Fall der festen Zielvorgabe bei der Positionsanfahrt erarbeitet. Im Anschluss daran wurde gezeigt, wie das Problem der Sollwertvorgabe ohne ein festes Ziel angegangen wird. Diese Art der Routenberechnung findet dabei neben der Sollwertvorgabe ebenso während der Initialisierung der Fahrzeuge statt, weil zu diesem Zeitpunkt noch kein festes Ziel besteht. Die Routenberechnung stellt in beiden Fällen nur den ersten Schritt in der Erstellung kompatibler dynamischer Daten für die Fahrzeuge dar. Dabei wird zunächst nur eine Abfolge von Streckenabschnitten bestimmt. Der zweite Schritt besteht in der Berechnung der RFID-Tag Daten, anhand derer sich das Fahrzeug später auf dem Streckennetz orientieren soll. Darüber hinaus wurde ein Vorgehen erarbeitet, wie durch Einsatz des Track Generators aus den berechneten Routen die Datenstruktur für die Fahrzeuge erzeugt wird.

Nach Erzeugung geeigneter Daten ist noch die Frage offen, wie die Daten an die Fahrzeuge übermittelt werden. Auch hierzu konnte ein Vorgehen erarbeitet und mithilfe der Modellstrecke erprobt werden. [Schmitz2013]

5.7 Anpassung Fahrzeugsimulator

Für die Durchführung der Softwareerprobung in Form von Hardware-in-the-loop Tests steht eine an der Ruhr-Universität im Rahmen des Projekts CargoCap entwickelte Fahrzeugsimulator-Software zur Verfügung, die das Verhalten der realen Fahrzeuge sowie der darauf implementierten Fahrzeug-Firmware nachbildet, indem mehrere virtuelle Fahrzeuge simuliert werden. In der Leitstand-Software und der Fahrzeug-Firmware werden diese virtuellen Fahrzeuge genauso behandelt wie die realen Fahrzeuge, d. h. es werden dieselben Statusdaten und Befehle verschickt. Im Unterschied zu einem realen Fahrzeug kann ein virtuelles Fahrzeug jedoch keine RFID-Tags an der echten Strecke einlesen. Mit Hilfe einer simulierten Beschleunigung bzw. Verzögerung erfolgt auf ähnliche Weise wie bei den realen Fahrzeugen eine Interpolation der Fahrzeugposition. Dabei ermittelt der Fahrzeug-Simulator durch Einsatz einer TrackDB pro Fahrzeug die Position der einzelnen Fahrzeuge in Relation zu den RFID-Tags auf dem Streckennetz.

Im Rahmen dieses Projekts mussten Änderungen an der Fahrzeugsimulator- Software vorgenommen werden, die notwendig sind, um die neu eingeführte Routenberechnung einzusetzen. Die in diesem Kapitel beschriebenen Anpassungen lassen sich dabei auch auf die Fahrzeug-Software der realen Fahrzeuge übertragen. Anschließend wird daraus eine geeignete Datenstruktur für die Fahrzeugsimulator- und Fahrzeug-Software erstellt und per Netzwerk übertragen.

In der ursprünglichen Implementierung wurden alle Routen, die die Fahrzeuge befahren können, in der TrackDB (Fahrwegdatenbank) der Fahrzeug-Software gespeichert. Dies war nur dadurch möglich, dass das Streckennetz aus zwei verbundenen Kreisen besteht. Durch diese Form sind alle möglichen Routen abgedeckt. Bei weiteren Verzweigungen ist die Komplexität jedoch zu groß, um alle möglichen Routen zu speichern. Um die bestehende Abstandsregelung und weitere bestehende und getestete Algorithmen möglichst nicht zu verändern, wurde in der nachfolgend beschriebenen Implementierung darauf geachtet, dass der grundsätzliche Aufbau der ursprünglichen TrackDB –sofern möglich – erhalten bleibt. Diese Algorithmen sind für die Bestimmung der relativen Position des Fahrzeugs und der Position weiterer Fahrzeuge auf die TrackDB als Datenbasis angewiesen.

Die TrackDB wurde auf Grund der veränderten Routenimplementierung angepasst sowie ein neues Konzept für die Initialisierungsfahrt erstellt. Da zum Start-Zeitpunkt der Software noch keine Position und somit auch keine Route bekannt ist, funktioniert das bestehende Konzept an dieser Stelle nicht mehr. Ebenfalls geändert wurde das Verhalten der Fahrzeug-Software im Fall der Vorgabe eines Sollwertes oder einer Positionsanfahrt durch die Leitstand-Software. Die bestehenden Algorithmen und Strukturen der Fahrzeug-Software erfordern einige Restriktionen, die bei der Erstellung von Streckennetzen zu beachten sind und im Rahmen dieses Projektes dokumentiert wurden. [Schmitz2013]

5.8 Ziele der Bewegungskoordination bei Abstandsregelung und Zusammenführungsregelung

Die Fahrzeugbewegungen der CargoCaps werden durch einen Fahrzeugrechner gesteuert, auf dem die Fahrzeugfirmware installiert ist. In diese integriert sind Regler, die die Fahrzeugbewegungen anhand verschiedener Eingangsdaten wie z.B. den Positionen und Geschwindigkeiten der anderen Fahrzeuge in der Umgebung und den Vorgaben durch den Leitstand koordinieren. Diese Regelung unterliegt dabei verschiedenen Kriterien, die zu erfüllen sind. Dies sind

- Die Sicherheit, die in eine systematische Sicherheit und eine fahrzeugdynamische Sicherheit zu unterteilen ist
- Der Durchsatz des CargoCap-Systems
- Die Energieeffizienz
- Die Pünktlichkeit

5.8.1 Systematische Sicherheit

Da in jedem mechatronischen System Komponenten ausfallen können und insbesondere die Kommunikation zur Außenwelt ein hohes Risiko für den Betrieb darstellt, wird in die Software ein sog. Watchdog integriert, der die Funktion der anderen Fahrzeuge überwacht und ggf. einen gezielten softwaretechnischen Nothalt einleitet. Dieser Watchdog wurde im Rahmen des Projekts entwickelt und wird in Kapitel 5.3 beschrieben. Zusätzlich kommt als Redundanzebene ein Abstandssensor zum Einsatz. Durch das gezielte Anhalten der Fahrzeuge wird eine mechanische Kollision mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vermieden.

5.8.2 Fahrzeugdynamische Sicherheit

Der fahrzeugdynamische Sicherheitsabstand ist der minimal zulässige Abstand zwischen zwei Fahrzeugen, der nicht unterschritten werden darf, um Kollisionen zu vermeiden.

Zu unterscheiden sind hierbei der absolute Bremsabstand und der relative Bremsabstand. Der absolute Bremsabstand ergibt sich aus der geometrischen Fahrzeuglänge d_{geom} , der aktuellen Geschwindigkeit v , der Reaktionszeit t_R und dem Verzögerungsvermögen a . Beim absoluten Bremsabstand d_{abs} kann ein Fahrzeug jederzeit bis zum Objekt anhalten.

Bei CargoCap wird für die Abstandsregelung und die Zusammenführungsregelung nach [Knüpfer2009], [Schmitt2011] und [Hölscher2012] der relative Sicherheitsabstand zugrunde gelegt, um das System energieeffizient und wirtschaftlich betreiben zu können.

5.8.3 Durchsatz

Der Durchsatz einer Strecke ergibt sich als Quotient zwischen der mittleren Fahrgeschwindigkeit der Fahrzeuge auf einer Strecke und dem mittleren Abstand zwischen zwei Fahrzeugen. Zu unterscheiden ist hiervon der Grenzdurchsatz einer Strecke, der sich aus der vorherrschenden Verkehrsdichte und der im Mittel erreichten Fahrgeschwindigkeit ergibt. Desweiteren gibt es eine durchsatz-optimale Fahrgeschwindigkeit, die [Hölscher2012] hergeleitet hat.

Der mögliche Durchsatz einer CargoCap-Fahrrohrleitung kann durch Simulationen untersucht werden. Auf Basis dieser Zahl kann entschieden werden, ob weitere Zuflüsse in die Fahrrohrleitung möglich sind oder sich dann Stauwellen bilden würden, die den Durchsatz der Fahrrohrleitung zum Erliegen bringen würden. Bei der Simulation hat [Hölscher2012] folgende Annahmen getroffen:

- Die maximale Fahrgeschwindigkeit liegt bei 10m/s
- Es werden lediglich fünf bzw. acht Fahrzeuge in einem Fahrverband dynamisch verkoppelt
- Im Fahrverband beträgt der lichte Abstand fünf Meter, zwischen den Fahrverbänden ist der erforderliche Abstand der absolute Bremsabstand
- Die maximale Fahrzeugbeschleunigung beträgt 1m/s^2

Ein Ergebnis der Simulation ist, dass der Durchsatz der Strecke bis zu einem Grenzwert proportional zur Anzahl der Fahrzeuge ansteigt. Dieser Grenzwert ist bei 50 Fahrzeugen pro Kilometer bei 5er-Fahrverbänden erreicht, bei 8er-Fahrverbänden sind 65 Fahrzeuge pro Kilometer möglich. Zu diesem Zeitpunkt hat das System noch gewisse Reserven, allerdings sollte eine deutliche weitere Steigung des Durchsatzes durch Zuflüsse an Zusammenführungen vermieden werden.

Bei Zusammenführungen ist zwischen der gleichberechtigten und der priorisierten Zusammenführung zu unterscheiden. Wenn beide auf eine Zusammenführung hinführenden Äste gleichberechtigt sind, muss die Zusammenführungsregelung so arbeiten, dass das erste Fahrzeug Vorfahrt hat und das zeitlich kurz danach eintreffende Fahrzeug im Abstand zum ersten Fahrzeug geregelt wird. Diese Zusammenführung läuft nach dem FIFO-Prinzip (first-in-first-out) ab. Bei der priorisierten Zusammenführungsregelung hat die Hauptstrecke gegenüber der Nebenstrecke grundsätzlich Vorfahrt. Der Durchsatz der beiden Äste steht nun in Abhängigkeit des Durchsatzes der anderen Strecke. Unter der Annahme von einem zufallsbedingtem Eintreffen an der Zusammenführung hat [Hölscher2012] in einer Simulation einen Vergleich zwischen beiden Varianten gezogen. Demnach ist der Gesamtdurchsatz bei der gleichberechtigten Zusammenführung insbesondere dann höher, wenn beide Streckenäste in etwa den gleichen Durchsatz aufweisen.

Wenn ein möglichst hoher Durchsatz einer Fahrrohrleitung erzielt werden soll, sollten folgende Aussagen Beachtung finden:

- Die Anzahl der Fahrzeuge in einem Fahrverband, die durch die Abstandsregelung dynamisch miteinander gekoppelt sind, sollte möglichst hoch sein, aber es sind hierbei ausreichende Lücken für einen stabilen Betrieb an Zusammenführungen notwendig, um keine zu großen Wartezeiten zu generieren
- Eine zeitweise geringfügige Verringerung des Fahrzeugabstandes vermeidet Stauwellen und erhöht die Systemstabilität
- Bei stark befahrenen Streckenästen, die aufeinander zuführen, ist eine Zusammenführungsregelung auf Systemebene notwendig
- Bei der Abstandsregelung und bei der Zusammenführungsregelung sind identische Sicherheitsabstände zu verwenden, um einen ausreichenden Durchsatz zu erzielen
- Zusammenführungen sollten mit der durchsatzoptimalen Geschwindigkeit durchfahren werden können

5.8.4 Energieeffizienz

Es ist von grundlegender Bedeutung, dass eine Transportaufgabe mit möglichst geringem Energieeinsatz erfüllt wird. In diesem Zusammenhang wurden auch die auftretenden Fahrwiderstände beschrieben, die im System wirken. Ein Bestandteil der Fahrwiderstandskräfte ist die Beschleunigungswiderstandskraft. Diese wird immer dann wirksam, wenn ein Fahrzeug seine aktuelle Geschwindigkeit ändert. Im Falle einer Verzögerung wird Energie frei, die bei CargoCap-Systemen den jetzigen Planungen nach in einem Energiespeicher zwischengespeichert werden kann; im Falle der Beschleunigung wird zusätzliche Energie benötigt.

Beschleunigungskräfte werden auch durch die Abstandsregelung und die Zusammenführungsregelung wirksam. Insofern ist ein besonderes Augenmerk auf die Regelcharakteristik zu legen. Wenn diese so eingestellt ist, dass der minimale Fahrzeugabstand möglichst exakt einzuhalten ist, ggf. auf wenige Zentimeter genau, um beispielsweise aerodynamische Vorteile wie den Windschatteneffekt bestmöglich auszunutzen, wird letztendlich der Energiebedarf des Fahrzeugs erhöht. Die Abstandsregelung wird nun instabil, das Fahrzeug, das auf sein vorausfahrendes Fahrzeug einregelt, wechselt nun unablässig zwischen Beschleunigen und Verzögern hin- und her. Selbst bei Vorhandensein einer Energiespeichereinrichtung wäre dieses Verhalten sehr ineffizient und sollte vermieden werden. [Hölscher2012] hat dieses Verhalten in einer Simulation dargestellt. In dieser sind der Abstand der beiden Fahrzeuge zueinander, die Geschwindigkeiten sowie der Gesamtenergiebedarf über die Zeit berechnet worden. Bei der Einregelung des Abstands kommt es aufgrund der hochdynamisch ausgelegten Regelung zu dem beschriebenen Systemverhalten.

Um das System energieeffizient zu betreiben, ist die Abstandsregelung mit einem Toleranzbereich zu versehen, sodass die Einregelung nicht hochdynamisch erfolgen muss. Desweiteren hat die Arbeit von [Schmitt2011] ergeben, dass nicht der Windschatteneffekt die maßgebliche Größe zu Senkung der Luftwiderstandskraft ist, sondern der Gesamtdurchsatz in der Fahrrohrleitung, da sich die Fahrzeuge die Arbeit zum Pumpen der Luft in der Rohrleitung aufteilen. Um den Windschatteneffekt nutzbar zu machen, müsste auf einen so geringen Abstand eingeregelt werden, dass eine hochdynamische Regelung notwendig würde, die durch das ständige Verzögern und Beschleunigen sämtliche energetische Vorteile zunichtemachen würden.

5.8.5 Pünktlichkeit

Die Pünktlichkeit ist eine der maßgeblichen Größen bei der Erfüllung einer Transportaufgabe. Ware sollte nach den logistischen Grundprinzipien zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort eintreffen. Wenn beispielsweise eine Transportaufgabe mit niedriger Priorität vorliegt, kann diese transportiert werden, wenn die Fahrrohrleitung nur schwach ausgelastet ist. Dann ist es auch empfehlenswert, die Transportgeschwindigkeit zu reduzieren, um den Luftwiderstand und somit den Energiebedarf klein zu halten. Dies wiederum hat einen Einfluss auf die Koordination der Transportaufgaben und auch die Abstands- und Zusammenführungsregelung, denn der Verkehr muss so koordiniert werden, dass diejenigen Fahrzeuge mit einer niedrigeren Priorität diejenigen mit einer höheren nicht im Vorankommen blockieren.

5.9 Koordinierung von Fahrbewegungen bei Abstandsregelung und Zusammenführungsregelung

Für die Fahrzeuge ist eine Longitudinalregelung erforderlich. Hierzu wird eine geeignete Reglerstruktur benötigt, die im Folgenden auf Basis theoretischer Grundlagen festgelegt werden muss.

5.9.1 Synchron, quasi-synchrone und asynchrone Longitudinalregelung

Nach [Hölscher2012] enthält die Literatur drei wesentliche Betriebsarten, die für die Longitudinalregelung von automatisierten Transportsystemen zum Einsatz kommen können. Dies sind der Synchronbetrieb, der Quasi-Synchron-Betrieb und der Asynchronbetrieb.

Beim Synchronbetrieb handelt es sich um eine Vielzahl virtueller Zellen, die auch Slots genannt werden und sich dabei synchron auf dem Streckennetz bewegen. Die Slotlänge ist dabei die Summe aus Fahrzeuglänge, Bremsweg und Sicherheitsabstand. Als Weg-Zeit-Diagramm ergeben sich dabei diagonale Linien, die auch vom Bildfahrplan der Bahn bekannt sind und die dichtest mögliche Folge von Fahrzeugen darstellen würde. Slots würden hierbei einzelnen Fahrzeugen zugewiesen und können nicht doppelt durch mehrere Fahrzeuge belegt werden. Vor Fahrtbeginn müsste so lange gewartet werden, bis eine unterbrechungsfreie Slotsequenz vom Startort bis zum Zielort vorliegt. Insbesondere bei einer hohen Fahrzeugdichte und einer Vielzahl von Verzweigungen und Zusammenführungen in größeren Streckennetzen gerät dieses System allerdings schnell an seine Grenzen.

Der Quasi-Synchronbetrieb stellt eine Erweiterung des oben beschriebenen Synchronbetriebs dar. Beim Auftreten von Slotkonflikten wird in diesem Fall eins der betreffenden Fahrzeuge in einen benachbarten Slot verschoben. Die Entscheidung hierüber wird durch streckenseitige Rechner getroffen. Mit der Einführung eines Quasi-Synchronbetriebs kann die Gesamtstreckenauslastung erhöht werden, gleichzeitig besteht aber eine zunehmende Gefahr, dass sich im System Stauwellen ausbreiten, da die Fahrzeuge nur den relativen Sicherheitsabstand zueinander aufweisen.

Durch Aufhebung der vorgegebenen Slots durch einen Zentralrechner und Übergabe der gesamten Regelung an das Fahrzeug selbst erfolgt ein Übergang zum sogenannten Asynchronbetrieb. Hierbei verkehren die Fahrzeuge geschwindigkeitsgeregelt entsprechend ihrer Sollwertvorgaben. Wird nun ein Sicherheitsabstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug unterschritten oder es erfolgt eine Bildung einer Fahrzeugfolge an einer Zusammenführung, so wird in einen abstandsgeregelten Modus umgeschaltet. CargoCap wurde seit seiner Entstehung für den Asynchronbetrieb ausgelegt, sodass im Folgenden nur noch diese Betriebsart berücksichtigt wird.

5.9.2 Dezentrale Longitudinalregelung

Der oben beschriebene Asynchronbetrieb wird als dezentrale Longitudinalregelung ausgeführt, wobei der Regler auf den Fahrzeugen selbst implementiert wird.

Hierbei sind grundsätzlich drei Fälle zu unterscheiden, die sich aus der Topologie eines Streckennetzes ergeben. Dies sind

- a) Fahrt auf einer verzweigungsfreien Strecke
- b) Fahrt auf einer sich verzweigenden Strecke
- c) Fahrt auf einer Strecke mit Zusammenführung von Streckenästen.

Bei einer **Fahrt** über eine **verzweigungsfreie Strecke** genügt es, zu bestimmen, ob ein Fahrzeug vorausfährt und welche ID dieses hat. Wenn ein solches in positiver Fahrtrichtung detektiert worden ist, muss die Position, die Fahrtgeschwindigkeit und die Fahrtrichtung ermittelt werden, wozu die Fahrzeuge in regelmäßigen Abständen Netzwerkpakete aussenden. Die Daten des ermittelten vorausfahrenden Fahrzeugs werden an die Abstandsregelung auf dem Fahrzeugrechner weitergegeben. Auf dieser Basis wird eine maximal zulässige Fahrtgeschwindigkeit ermittelt, die als Sollwert an den Geschwindigkeitsregler weitergegeben wird. Dieser Sollwert wird dabei kontinuierlich neu berechnet und angepasst.

Ist innerhalb einer bestimmten Vorausschautfernung kein anderes Fahrzeug vorhanden, so kann das Fahrzeug stattdessen geschwindigkeitsgeregelt entsprechend seiner Sollwertvorgaben fahren.

Nähert sich ein Fahrzeug einer **Verzweigung**, so ist neben dem vor der Verzweigung noch vorausfahrenden Fahrzeug auch eine Betrachtung des Streckenästes notwendig, den das Fahrzeug selbst befährt. Befährt das Fahrzeug die gleiche Strecke wie sein Vordermann, so genügt die Fixierung auf diesen im abstandsgeregelten Modus. Sind allerdings beide Fahrtrouten unterschiedlich und befindet sich auf der Route, die das Fahrzeug selbst einschlagen will, ein Hindernis (stillstehendes oder langsamfahrendes Fahrzeug), so könnte es zu einer Kollision kommen.

Die Gewährleistung einer sicheren **Zusammenführung** von Fahrzeugen, die aus unterschiedlichen Strecken kommen, ist sehr aufwändig und grundsätzlich mit einem hohen Kollisionsrisiko verbunden als bei der koordinierten Bewegung auf unverzweigten Strecken. Dieses Kollisionsrisiko muss durch einen passenden Algorithmus ausgeschlossen werden.

Für eine effiziente und sichere Zusammenführung müssen folgende Kriterien erfüllt werden:

- Zielfunktion: Bestimmung optimale Fahrzeugreihenfolge im Sinne einer Durchsatzmaximierung, Minimierung der durchschnittlichen Zeitdauer, in denen die Fahrzeuge die Zusammenführung erreichen bei gleichzeitiger Vermeidung unnötiger Beschleunigungen zur Reduzierung des Energiebedarfs
- Vorrang: Fahrzeuge auf dem gleichen Streckenast behalten ihre Reihenfolge bei
- Gegenseitiger Ausschluss: Zu einem Zeitpunkt kann nur ein Fahrzeug die Zusammenführung passieren
- Sicherheitsabstand: Zu keinem Zeitpunkt darf dieser während des Zusammenführungsprozesses zwischen zwei Fahrzeugen unterschritten werden
- Bei Erreichen der Zusammenführung muss ein Fahrzeug die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs angenommen haben
- Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsgrenzen: Die fahrdynamischen Grenzen der Fahrzeuge sind einzuhalten

Auf dieser Basis kann der Sollabstand zur Zusammenführung bestimmt werden. Die Gleichheit der Geschwindigkeiten wird durch eine Begrenzung der Sollgeschwindigkeit erreicht.

Darauf basierend kann die Maximalgeschwindigkeit für das Fahrzeug bestimmt werden, die das Minimum der Grenzeschwindigkeit der verzweigungsfreien Abstandsregelung und der Zusammenführungsregelung darstellt.

Einen Sonderfall stellt der Fall dar, dass auf einer Nebenstrecke, z.B. in einer Station Fahrzeuge stehen, die zu Beginn ihrer Fahrt auf eine Lücke warten und sich dort einfädeln. Hierzu muss ein geeigneter Zusammenführungszeitpunkt berechnet werden, wozu der Gap Acceptance Merge Algorithmus zwei Fälle unterscheidet:

Fall 1: der Abstand zur Zusammenführung ist für die Beschleunigung ausreichend, vor der Zusammenführung ist bereits die Endgeschwindigkeit erreicht.

Fall 2: der Abstand zur Zusammenführung ist unzureichend, auch hinter der Zusammenführung beschleunigt das Fahrzeug weiter, um die Zielgeschwindigkeit zu erreichen. Der Gap Acceptance Merge Algorithmus sorgt hierbei dafür, dass ein Fahrzeug erst dann die Fahrt beginnt, wenn eine ausreichend große Lücke zwischen zwei Fahrzeugen auf der Hauptstrecke erreicht ist. Eine weiterführende Beschreibung ist in [Hölscher2012] enthalten.

5.9.3 Systeme der Verkehrsflussregelung

Zusätzlich zur dezentralen Longitudinalregelung, die durch die Fahrzeugrechner durchgeführt werden, ist der Einsatz einer übergeordneten Verkehrsflussregelung empfehlenswert. Die sorgt für eine optimale Ausnutzung der Streckenkapazität und senkt den Gesamtenergiebedarf des Verkehrssystems. Die übergeordnete Verkehrsflussregelung hat im Wesentlichen zwei Aufgaben und sollte insbesondere dann zum Einsatz kommen, wenn die Fahrzeugdichte im System soweit ansteigt, dass der Gesamtdurchsatz beispielsweise aufgrund von Stauwellen zusammenbrechen könnte:

- Vorgabe von Richtgeschwindigkeiten auf einzelnen Streckenabschnitten
- Begrenzung des Fahrzeugzuflusses aus Stationen und Nebenstrecken, um den Gesamtdurchsatz des Systems zu maximieren

Folgende Verkehrsflussregelungen, die grundsätzlich für den Einsatz bei CargoCap geeignet scheinen, konnten aus der Literatur entnommen werden:

- Alinea/Q
- Helper Ramp
- Swarm
- Fuzzy-Regelung
- Neuronale Netze

Im Folgenden werden die Verkehrsflussregelungen beschrieben und anschließend bewertet.

Alinea/Q

Alinea/Q steht für Asservissement Linéaire d'entrée autoroutière und ist eine lokale Zuflussregelung, die lediglich die Zuflussrate einer Auffahrt steuert. Hierzu werden die Verkehrsdaten beider Streckenäste an einer Verzweigung ermittelt.

Die maximal zulässige Zuflussrate $r(t)$ beträgt demnach

$$r(t) = r(t - 1) + K_r * (\hat{o} - o(t))$$

wobei $r(t-1)$ die zuletzt gemessene Zuflussrate ist, K_r eine Reglerverstärkung, \hat{o} die Zielbelegungsrate der Hauptstrecke und $o(t)$ die aktuelle Belegungsrate der Hauptstrecke.

Der Alinea-Algorithmus kann allerdings auch ein Rückstauverhalten verursachen. Beim Überschreiten der Zielbelegungsrate der Hauptstrecke bildet sich auf der Auffahrt eine Warteschlange, die sich ungehindert immer weiter aufstauen kann und die nachgelagerte Infrastruktur blockiert. Als Maßnahme, die dem entgegenwirkt, verfügt Alinea über einen sogenannten Queue-Override, der bei Erreichen einer kritischen Warteschlangenlänge die Hauptstrecke blockiert und die Auffahrt freigibt. Dies wiederum führt zu einem oszillierenden Verhalten in der Verkehrsdichte und auch Staus auf der Hauptstrecke.

Als Erweiterung von Alinea gibt es auch einen Queue-Control-Mechanismus, der als Alinea/Q bezeichnet wird. Hierbei wird die Warteschlangenlänge an den Auffahrten unterhalb einer kritischen Länge gehalten.

Desweiteren hat diese Verkehrsflussregelung aber auch eine Auswirkung auf nachgelagerte Auffahrten. Wird durch die lokale Zuflussregelung auf der Hauptstrecke die Zielbelegungsrate erreicht und fließt dahinter kein Verkehr ab, so können an den nachfolgenden Auffahrten auch keine Fahrzeuge auf die Hauptstrecke gelangen. Infolge dessen bilden sich dort zunehmend Staus.

Helper Ramp

Helper Ramp ist eine Verkehrsflussregelung, die seit den 1980er Jahren auf Highways in den USA verwendet wird. Es handelt sich hierbei um ein System lokaler Regelungen an den einzelnen Auffahrten, die ähnlich wie Alinea/Q aufgebaut sind, jedoch erweitert um eine zentrale übergeordnete Steuerungskomponente. Jede lokale Regelung bestimmt zunächst die für diese Auffahrt sinnvolle Zuflussrate. Sobald die Warteschlangenlänge einen kritischen Wert erreicht oder die Zuflussrate zu gering wird, greift die übergeordnete Steuerung ein und koordiniert die Zuflussraten im weiteren Umfeld, sodass der Gesamtdurchsatz und die lokalen Zuflussraten zufriedenstellend sind.

SWARM

SWARM steht für System Wide Adaptive Metering. Dieses System weist wie Helper Ramp eine lokale Regelungsebene und eine übergeordnete koordinierende Steuerungsebene auf. Die lokale Komponente regelt hierbei die Verkehrsdichte, die möglichst hoch sein sollte. Gleichzeitig begrenzt die übergeordnete Komponente durch Ampelsteuerungen die Zuflussraten innerhalb eines Segmentes des Verkehrsnetzes, sodass es zu keinem Zeitpunkt zu hohen Verkehrsdichten kommt. Hierzu wird die

zukünftige Verkehrsdichte innerhalb eines Zeitbereiches abgeschätzt und die eine kritische Verkehrsdichte bestimmt. Auf dieser Basis und den gemessenen aktuellen Verkehrsdichten wird die Zieldichte ermittelt.

Fuzzy-Regelung

Bei der Fuzzy-Regelung wird kein präzises mathematisches Modell für das Regelungsverhalten zugrunde gelegt, sondern ein Satz von Regeln, die auf dem Wissen des Anwenders, Simulationen und analytischen Berechnungen basieren tritt als Wenn – dann – Regel an diese Stelle.

In einem ersten Schritt werden die Eingangs- und Stellgrößen in linguistische Werte überführt wie „schnell“ oder „hohes Verkehrsaufkommen“. Eine Geschwindigkeit von 6 m/s ist vorgesehenen Systemgeschwindigkeit von 10 m/s zu 60% schnell und zu 40 % langsam. Auf Basis mehrerer dieser Stellgrößen und Verknüpfung der Regeln können dann „Wenn-Dann“-Entscheidungen getroffen werden.

Neuronale Netze

Neuronale Netze und die zuvor kurz erläuterten Fuzzyregelungen entstammen der künstlichen Intelligenz. Bei neuronalen Netzen werden Informationen unabhängig von ihrer Bedeutung in Mikrostrukturen verarbeitet. Gemäß der Literatur sind neuronale Netze in wenigen Fällen zur Verkehrsflussregelung eingesetzt worden. Hierbei wurden Verkehrsdaten analysiert und zugleich das Ziel einer Stauverhinderung verfolgt. Auf Basis der Vorhersage einer Belegungsrate kann bereits im Vorfeld das Entstehen von Staus vorausgesagt werden und durch Gegenmaßnahmen wie der Beeinflussung von Zuflussraten verhindert werden.

Diskussion der Verkehrsflussregelungen

Bislang liegt kein empirisches Wissen über das Systemverhalten von CargoCap bei unterschiedlichen Verkehrsdichten vor. Daher ist zumindest in der Anfangsphase es sehr empfehlenswert, einen einfachen und gut nachvollziehbaren Algorithmus zur Verkehrsflussregelung zu verwenden. Fuzzy-Regelungen oder neuronale Netze können ggf zu einem späteren Zeitpunkt Anwendung finden, müssten aber auch hinsichtlich Betriebssicherheit untersucht werden.

Vielversprechend ist die Verwendung eines Alinea/Q-Algorithmus in Kombination mit einer übergeordneten koordinierenden Komponente, wie sie bei Helper Ramp enthalten ist. Somit werden die Zuflüsse an Auffahrten lokal gesteuert und gleichzeitig eingegriffen, wenn einzelne Auffahrten aufgrund vorgelagerter Zuflüsse keinen ausreichenden Zufluss mehr erreichen können. Die übergeordnete Komponente kann in die Planungsebene des Systems (Leitstand) integriert werden, von dem aus ggf auch alternative Fahrtrouten an einzelne Fahrzeuge gesendet werden können, um Staus in bestimmten Bereichen des Streckennetzes zu vermeiden.

5.9.4 Anpassung der Führungsgeschwindigkeit

Neben den Betriebszeiten, wo eine sehr hohe Auslastung des Netzes vorherrscht und zur Sicherstellung eines ausreichenden Durchsatzes Eingriffe in die Zuflüsse an Zusammenführungen und zusätzliche eine übergeordnete Systemebene erforderlich sind, kann es auch Betriebszeiten geben, wo nur ein geringer Systemdurchsatz existiert. Insbesondere dann besteht die Möglichkeit, den Energiebedarf des Gesamtsystems aktiv zu beeinflussen. Dies ist auf die Aerodynamik der Fahrzeuge zurückzuführen, die in der Arbeit von Martin Schmitt [Schmitt2009] untersucht worden ist und Bestandteil des ersten von der DBU geförderten CargoCap-Projektes war (Az 24592/01). Demnach sind die einzelnen Fahrzeuge als Pumpen in einem Rohrleitungsnetzwerk anzusehen. Gemeinsam induzieren sie eine Luftströmung. Je mehr Fahrzeuge zugleich in einem Rohrleitungsabschnitt die Luft anschieben, desto geringer ist der Energiebedarf des einzelnen Fahrzeugs zur Erbringung einer Transportleistung.

Wenn nun ein Streckenabschnitt nur eine geringe Nachfrage aufweist, so existieren zwei Maßnahmen, um den Gesamtenergiebedarf gegenüber einer unkoordinierten Fahrtweise zu beeinflussen. Dies sind

- Die Reduzierung der Systemgeschwindigkeit
- Die Realisierung eines intermittierenden Betriebs

Nach [Schmitt2011] beträgt die aerodynamische Leistungsaufnahme am Arbeitspunkt

$$P_{aero} = F_{Luftwiderst,nenn} * v_{nenn} = C * (1 - \beta_{nenn})^2 * v_{nenn}^3$$

Hierbei enthält C alle konstanten Größen und β_{nenn} ist die dimensionslose induzierte Strömungsgeschwindigkeit in der Fahrrohrleitung. Erheblich ist der Einfluss, wenn die Systemgeschwindigkeit abgesenkt wird, da diese kubisch in die aerodynamische Leistungsaufnahme eingeht.

Die optimale Systemgeschwindigkeit $v_{sys,opt}$, die zu einer äquivalenten Leistungsaufnahme führt, beträgt demnach

$$v_{sys,opt} = \sqrt[3]{\frac{P_{soll, aero}}{C*(1-\beta(0))^2}}$$

Ist eine noch geringere Leistungsaufnahme gewünscht und spricht aus Gründen des Systemdurchsatzes und der Erfüllung der Transportaufgaben nichts dagegen, so kann die Systemgeschwindigkeit noch weiter abgesenkt werden.

Durch einen hohen Durchsatz im entsprechenden Abschnitt der Fahrrohrleitung steigt der Wert von β_{nenn} an, die aerodynamische Leistungsaufnahme sinkt. Wenn nun in einem Zeitintervall zahlreiche Fahrzeuge gebündelt durch eine Fahrrohrleitung fahren, so induzieren sie gemeinsam eine höhere Strömungsgeschwindigkeit in der Fahrrohrleitung, ausgedrückt durch den Wert β_{nenn} . Somit ermöglicht ein intermittierender Betrieb, bei dem in einem Zeitintervall mit möglichst großem Durchsatz gefahren wird und anschließend wieder eine Ruhephase eintritt, eine weitere Möglichkeit, den Energiebedarf des Systems gegenüber einer stochastischen Fahrzeugverteilung bei geringer Systemauslastung zu reduzieren.

5.10 Verifikation der Regelungen

In diesem Kapitel werden die bereits beschriebenen Regelungen verifiziert.

Die Longitudinalregelung wird durch die Fahrzeuge selbst ausgeführt. Die Funktionsfähigkeit der Abstandsregelung wurde durch Versuchsreihen an der Modellstrecke nachgewiesen. Zuvor waren bereits Simulationen mit dem in Kapitel 5.1.4 beschriebenen Fahrzeugsimulator durchgeführt worden, um sicherzustellen, dass es bei Versuchsfahrten auf der Modellstrecke mit mehreren Fahrzeugen nicht zu Kollisionen kommt.

Die Funktionsfähigkeit der Zusammenführungsregelung wurde durch Versuche mit einer Hardware-in-the-loop-Umgebung an der Modellstrecke nachgewiesen. Hierbei wurden Fahrzeuge simuliert, die mit realen Fahrzeugen kommunizieren. Beide stoßen in unterschiedlichen Betriebsszenarien an der Zusammenführung aufeinander, sodass unterschiedliche Systemreaktionen erzwungen werden.

Darüber hinaus enthält dieses Kapitel einen Nachweis über die Funktionsfähigkeit der übergeordneten Verkehrsflussregelungen. In diesem Fall wurden ebenfalls Simulationen mit Matlab durchgeführt.

5.10.1 Verifikation der Longitudinalregelung

Die Verifikation der Longitudinalregelung wurde an der Modellstrecke durch Versuchsfahrten und Simulationen mit dem Fahrzeugsimulator durchgeführt.

Einer der versuchstechnisch untersuchten Fälle sah wie folgt aus (hier als Beispiel):

Das vordere Fahrzeug fährt durchweg mit einer konstanten Geschwindigkeit von 2,8m/s. Das hintere Fahrzeug steht zunächst, erhält einen Sollwert von 5 m/s und beschleunigt zunächst. Ist der Optimalabstand erreicht, wird durch die Abstandsregelung eine Verzögerung eingeleitet, sodass dieses Fahrzeug bei der weiteren Annäherung an seinen Vordermann kontinuierlich seine Fahrtgeschwindigkeit reduziert, bis ein konstanter Abstand erreicht ist und beide Fahrzeuge die gleiche Geschwindigkeit aufweisen. Abschließend erhält das vorderere Fahrzeug den Befehl, anzuhalten und verzögert. Das hintere Fahrzeug folgt diesem.

In zahlreichen Konfigurationen stellt die Longitudinalregelung auf der Modellstrecke bei Zweifahrzeugbetrieb ständig ihre Funktion unter Beweis.

5.10.2 Verifikation der Zusammenführungsregelung durch Versuchsfahrten in einer Hardware-in-the-loop-Umgebung

Zur Erprobung der Zusammenführungsregelung und zum Nachweis der Funktionalität wurde der vorhandene Fahrzeugsimulator in Zusammenspiel mit den beiden realen Fahrzeugen in einer Hardware-in-the-loop-Umgebung (HiL) an der Modellstrecke in verschiedenen Fahrsituationen getestet.

Um die Daten während der Fahrt zu sammeln, wurde eine Sniffer-Software entwickelt, die die Statusdaten der Fahrzeuge sammelt, die die Grundlage der Auswertung der HiL-Umgebung bietet. Desweiteren beschreibt dieser Abschnitt den Versuchsaufbau und die Durchführung.

Entwicklung eines Status Paket Sniffers

Für die Untersuchung des Verhaltens der Fahrzeuge in vorgegebenen Fahrsituationen müssen deren Statusdaten gesammelt und in geeigneter Form aufbereitet werden. Da die Fahrzeuge ihren aktuellen Status bereits selbst in Form der StatPacket-Objekte im Netzwerk per Broadcasting verteilen, genügt es, diese Netzwerkpakete zu sammeln und für die weitere Nutzung in lesbarer Form zu speichern. Für diesen Zweck wurde die Software „StatPacketSniffer“ entwickelt.

Bei jedem Empfang eines Pakets wird zunächst die Fahrzeug ID extrahiert. Anhand der Fahrzeug ID wird anschließend pro Fahrzeug eine eigene Text-Datei angelegt, in der die Statusdaten pro Fahrzeug gespeichert werden. Dabei werden folgende Daten in die Datei geschrieben:

- Zeitpunkt des Paketempfangs [*ms*]
- LastTag – Zuletzt überfahrendes RFID-Tag
- NextTag – Nächstes zu überfahrendes RFID-Tag
- Position – Gefahrene Distanz seit LastTag [*cm*]
- IsSpeed – Aktuelle Ist-Geschwindigkeit [*cm/s*]
- TargetSpeed – Vorgegebene Soll-Geschwindigkeit [*cm/s*]
- MergeTime – Relevante Zeit für Zusammenführungsalgorithmus [*s/100*]

Damit die einzelnen Statusdaten der verschiedenen Fahrzeuge auf Basis diskreter Zeitpunkte vergleichbar sind, muss ein gemeinsamer Nullpunkt für alle Paketdaten definiert werden.

Versuchsaufbau und Durchführung und Ergebnisse

Für den Versuchsaufbau wurde eine Testreihe mit insgesamt vier Testfällen entworfen. Vorab wurde dazu überlegt, welche Position die einzelnen Fahrzeuge (ein reales Fahrzeug, drei virtuelle Fahrzeuge) zu Beginn der einzelnen Versuche auf dem Streckennetz einnehmen sollen, um dadurch ein bestimmtes Verhalten zu erzwingen.

Um vergleichbare Ergebnisse für die Versuchsauswertung zu erzielen, wurde zunächst die Leitstand-Software dahingehend erweitert, dass eine gleichzeitige Befehlsvorgabe (Sollwertvorgabe) für alle Fahrzeuge erfolgen kann. Für die Vorbereitung der einzelnen Versuche wurden die Fahrzeuge entsprechend vorweg ausgedachter Szenarien positioniert. Anschließend wurden den realen Fahrzeugen und den virtuellen Fahrzeugen Sollwerte übertragen.

Das Fahrzeugverhalten wurde bei mehreren Betriebsfällen beobachtet und analysiert. Für die Dokumentation der einzelnen Testreihen wurde zum einen der im vorherigen Abschnitt beschriebene StatPacketSniffer eingesetzt, der die Versuchsdaten in textueller Form aufbereitet und abspeichert. Zum anderen wurde für jeden Versuch eine visuelle Dokumentation erstellt, indem die Visualisierung der Leitstand-Software in einem Screencast aufgenommen und in einer Videodatei abgespeichert wurde. Anhand der Visualisierung lassen sich optisch die Positionen der einzelnen Fahrzeuge nachvollziehen.

Die Software auf dem realen Fahrzeug unterscheidet sich von den virtuellen Fahrzeugen hinsichtlich der implementierten Algorithmen ein wenig von der Fahrzeugsimulator-Software für die virtuellen Fahrzeuge. Auf dem realen Fahrzeug ist neben der Abstandsregelung auf freier Strecke auch eine Regelung im Vorfeld von Zusammenführungen aktiv. Die dafür zuständigen Algorithmen nehmen beide Einfluss

auf das Fahrverhalten in den Testreihen. In der Fahrzeugsimulator-Software ist neben diesen Regelalgorithmen ein zusätzlicher Algorithmus – der modifizierte Gap-Acceptance-Merge (GAM) Algorithmus– für das Beschleunigen aus einer Station bei gleichzeitigem Auffahren auf die Hauptstrecke aktiv. Außerdem unterscheiden sich reale und virtuelle Fahrzeuge durch ein leicht unterschiedliches Brems- und Beschleunigungsverhalten, das bei den Testfahrten berücksichtigt werden muss.

Es zeigt sich, dass die Zusammenführungsregelung in allen Szenarien grundsätzlich funktioniert, vor einer Erstanwendung durch entsprechende Parametrisierung aber noch optimiert werden kann. Es konnten wie erwartet verschiedene Situationen beobachtet werden. So fährt z.B. ein Fahrzeug gezielt in eine Lücke zwischen zwei Fahrzeugen ein oder es hält bei dichter aufeinander fahrenden Fahrzeugen auf der anderen Strecke gezielt vor der Zusammenführung an und fährt nach dem Passieren eines Fahrverbands wieder an.

5.10.3 Verifikation der Verkehrsflussregelung durch Simulation

Simulation der Verkehrsflussregelung

Neben den dezentral arbeitenden Longitudinal- und Zusammenführungsregelungen wurden auch die übergeordnete Verkehrsflussregelung verifiziert. Hierzu hat [Hölscher2012] einen zellulären Zustandsautomaten in Matlab programmiert. Bei diesem werden die Strecken in Zellen zerlegt, die durch ihren Zustand – belegt oder unbelegt – beschrieben werden. Für die räumliche Auflösung wurde eine Fahrzeuglänge gewählt. Zur Untersuchung der Strecke wurde die in [Stein2009] projektierte Ruhrgebietsstrecke ausgewählt, von der ein hochbelasteter repräsentativer Abschnitt ausgewählt worden ist. Für diese wurden im Rahmen der Marktpotentialanalyse ein mögliches Verkehrsauskommen zu unterschiedlichen Tageszeiten auf unterschiedlichen Streckenabschnitten ermittelt und im Rahmen von Verkehrsflussmatrizen dargestellt.

Bei der Simulation wird zwischen dynamisch verketteten Fahrzeugen unterschieden, die als Verband im relativen Bremsabstand fahren, und solchen, die sich im absoluten Bremsabstand zueinander bewegen. Welcher der Fälle vorliegt, entscheidet sich auf Basis der absoluten Fahrzeugposition relativ zum vorausfahrenden Fahrzeug. Die maximale Anzahl von Fahrzeugen in einem Verband beträgt fünf Stück, diese fahren im relativen Bremsabstand zueinander. Das nächste Fahrzeug folgt mit dem absoluten Bremsabstand als Minimalabstand. d_{vor} sind hierbei die Anzahl der unbelegten Zellen zwischen dem eigenen Fahrzeug und dem vorausfahrenden Fahrzeug und $v_{vor}(t-1)$ die Geschwindigkeit zu einem früheren Zeitpunkt $t-1$.

Formelmäßig wird diese Entscheidung im Simulator ausgedrückt durch:

$$z(n) = 1 \text{ für } d_{vor} > d_{abs,max} \text{ und für } z(n - 1) = 5$$

$$z(n - 1) + 1 \text{ sonst (hochzählen bis maximal 5)}$$

Das Verhalten eines im relativen Bremsabstand fahrenden Fahrzeugs wird folgendermaßen beschrieben:

$$v(t) = \max[v(t - 1) - 1; 0] \text{ für } \frac{v^2(t-1) - v_{vor}^2(t-1)}{2a} + 1 \geq d_{vor} \text{ (Bremsen)}$$

$$v(t) = v(t - 1) + 1 \text{ für } v(t - 1) < v_{max} \text{ (Beschleunigen)}$$

$v(t) = v(t - 1)$ sonst (gleichbleibende Maximalgeschwindigkeit)

Das Verhalten eines im absoluten Bremsabstand fahrenden Fahrzeugs wird beschrieben durch:

$v(t) = \max [v(t - 1) - 1; 0]$ für $\frac{v^2(t-1)}{2a} + 1 \geq d_{vor}$ (Bremsen)

$v(t) = v(t - 1) + 1$ für $v(t - 1) < v_{max}$ (Beschleunigen)

$v(t) = v(t - 1)$ sonst (gleichbleibende Maximalgeschwindigkeit)

In realen Anwendungen werden bei einer überkritischen Verkehrsdichte Stauwellen durch minimale Abweichungen von der Sollgeschwindigkeit hervorgerufen. Dafür werden in diesem Simulator zufällig einzelne Geschwindigkeiten leicht variiert, sodass auch hier ein solches Verhalten hervorgerufen wird.

Abfahrten werden im Simulator abgebildet, indem einzelne Fahrzeuge an einem bestimmten Ort s mit einer vorzugegeben Wahrscheinlichkeit i randomisiert mittels Normalverteilung aus der Strecke heraus gelöscht werden.

An Auffahrten werden mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit Fahrzeuge hinzugefügt. Hierzu wird eine Warteschlange gebildet, aus der ein Fahrzeug mit der aktuellen Systemgeschwindigkeit in die Hauptstrecke eingeschleust wird, wenn auf der Hauptstrecke eine gemäß dem Algorithmus ausreichende Lücke vorhanden ist.

Es wurden folgende Szenarien abgebildet:

- Ruhrgebietstrasse nach [Stein2009] bei durchschnittlicher Streckenauslastung
- Ruhrgebietstrasse nach [Stein2009] bei hoher Streckenauslastung
- Ruhrgebietstrasse nach [Stein2009] mit Zuflussregelung nach Alinea/Q
- Ruhrgebietstrasse nach [Stein2009] mit Zuflussregelung nach Alinea/Q und zusätzlichem GapAcceptanceMerge-Algorithmus

Die Simulationen der einzelnen Szenarien werden zur Analyse grafisch in Weg-Zeit-Diagrammen dargestellt. Bei konstanter Geschwindigkeit und geringer Verkehrsflussdichte würde man den Verlauf eines einzelnen Fahrzeugs als eine diagonal von links oben nach rechts unten durch das Diagramm verlaufene Punktlinie sehen. Durch die stochastische Verteilung und die fahrdynamischen Effekte verschwimmt dies aber vielmehr zu einer Punktelwolke, in der lediglich größere Fahrzeugkonzentrationen zu einer Zeit an einem Ort ausgemacht werden können, indem sich dort die „Punktelwolke“ verdichtet. Auf diese Weise lassen sich dort Stauwelle etc. detektieren.

Bei der durchschnittlichen Streckenauslastung ohne zusätzliche Verkehrsflussregelung funktioniert das System auch ohne übergeordnete Koordination. Lediglich im Bereich der Auffahrten konnten geringfügige Verdichtungen der Verkehrsdichte ausgemacht werden, die restlichen Fahrzeuge sind im System, das als Weg-Zeit-Diagramm dargestellt wird und bei der jeder Punkt ein Fahrzeug am Ort s zur Zeit t darstellt, gleichverteilt.

Wird die Verkehrsdichte weiter erhöht und die maximale Auslastung der Ruhrgebietstrecke nach [Stein2009] zugrunde gelegt, wird ersichtlich, dass sich deutliche Stauwellen ausbilden.

Aus der gesteigerten Auslastung wird also ersichtlich, dass eine Verkehrsflussregelung an den Zusammenführungen sinnvoll ist, um unnötige Staueffekte und somit unnötige Kosten zu vermeiden.

Zunächst wurde der Alinea-Q-Algorithmus als Verkehrsflussregelung in die Simulation implementiert. Hierzu wird das Auffahrtsmodul des Simulators erweitert. Die Koordination an den Auffahrten erfolgt, indem von der mittels Alinea ermittelten Zuflussrate $r(t,i)$ zum Zeitpunkt t an einer Station i der zusätzliche Kapazitätsbedarf der folgenden Station $i+1$ stromabwärts subtrahiert wird. Dieser zusätzliche Kapazitätsbedarf entspricht dem gewichteten Anteil der Queue Control an der Zuflussrate und ist somit proportional zur überkritischen Warteschlangenlänge.

Es konnte gezeigt werden, dass die Verwendung der Verkehrsflussregelung Alinea/Q einen positiven Einfluss auf den Verkehrsfluss hat: Die Auslastung der Strecke ist hierbei so hoch wie bei der zuvor durchgeführten Simulation. Stauwellen treten nun nicht mehr auf, die Fahrzeuge sind deutlich homogener über das Streckennetz verteilt. Mikroverdichtungen des Verkehrsflusses treten teilweise noch im Bereich der Auffahrten auf, lösen sich aber nach kurzer Zeit wieder auf.

Um die Performance weiter zu bessern, wurde in einer weiteren Simulation eine Erweiterung um den Gap Acceptance Merge Algorithmus vorgenommen. Hierzu wird zunächst die Zuflussrate von $r(t,i)$ Fahrzeugen pro Minute in ein Intervall von $T_{w\#}$ Zeitschritten umgerechnet, nach dessen Ablauf mit dem Einschleusungsprozess in die Hauptstrecke begonnen wird:

$$T_{w\#} = \frac{60}{\Delta t * r(t,i)}$$

Die reale Zuflussrate wird aus der tatsächlichen Wartezeit T_w bestimmt:

$$r(t-1, i) = \frac{60}{\Delta t * T_{w(t-1,i)}}$$

Ist nach Ablauf der Wartezeit eine ausreichend große Lücke vorhanden, wird in diese ein Fahrzeug hinzugefügt. Andernfalls wird weiter gewartet.

Wenn ein neues Fahrzeug in eine Lücke eingefügt wird und gleichzeitig bereits die Verkehrsdichte hoch ist, so führt das Einfügen zu einer Änderung der kinematischen Koppelungen zwischen den Fahrzeugen, da sich die Verbände verschieben. Dies verursacht einen sog. „Geschwindigkeitsstoß“, aus dem eine Stauwelle hervorgehen kann. Wenn gleichzeitig die Kompressibilität des Systems erhöht wird, ist eine Steigerung des Durchsatzes bei gleichzeitiger Systemstabilität möglich.

Durch diese zusätzliche Maßnahme wird der Fahrzeugfluss weiter homogenisiert.

Simulation des energieoptimalen Betriebs mit Anpassung der Systemgeschwindigkeit

Wie bereits in Kapitel 5.9.4 dargelegt, bietet eine Absenkung der Systemgeschwindigkeit bei geringer Auslastung des Streckennetzes ein energetisches Einsparpotential. [Hölscher2012] hat hierzu den Zellularautomaten angepasst, die Systemauslastung auf 15% des vorherigen Wertes reduziert und die Systemgeschwindigkeit in Folge der Belegung auf Basis der im System befindlichen Fahrzeugzahl in Form einer Tabelle berechnet, auf die der Simulator lesend zugreift.

Das Ergebnis der Simulation zeigt erwartungsgemäß, dass sich anfangs einzelne Fahrzeuge mit stark reduzierter Geschwindigkeit bewegen. Wenn weitere Fahrzeuge hinzukommen, erhöht sich die Belegungsrate der Strecke und die Systemgeschwindigkeit steigt an.

Desweiteren stellt die Simulation dar, wie sich das System verhält, wenn Fahrzeuge starten, die eine höhere Priorität haben und unabhängig von dem dann höheren Energieverbrauch mit Maximalgeschwindigkeit durch die Fahrrohrleitung fahren. Dabei starten die Fahrzeuge an bestimmten Punkten. Die davor befindlichen Fahrzeuge beschleunigen nun ebenfalls, um ein Ausbremsen zu verhindern. Hinter den priorisierten Fahrzeugen bilden sich keilförmige Lücken aus, in denen die Belegung der Trasse gering ist.

Die Alternative zur Variation der Systemgeschwindigkeit besteht in der Einführung eines intermittierenden Betriebs. In dieser Variante wird die aktuelle systemweite Belegungsrate, die aus der Summe der fahrenden und der wartenden Fahrzeuge ermittelt wird, mit Schwellwerten verglichen. Wird ein unterer Schwellwert unterschritten, so sind die Fahrzeuge anzuhalten bzw. keine neuen Fahrten zu initiieren; wird ein oberer Schwellwert überschritten, so ist die Aufnahme des regulären Betriebs einzuleiten. In dieser Simulation füllen sich die Stationen und die Fahrzeuge werden gebündelt auf Reisen geschickt. Auch in diesem Fall werden priorisierte Fahrzeuge eingesetzt, deren Fahrt allerdings keinen direkten Einfluss auf die anderen Fahrzeuge im System hat. [Hölscher2012]

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsvorhaben „Weiterentwicklung und Erprobung der Verzweigungstechnik für einen energieeffizienten und sicheren Betrieb des unterirdischen Güterverkehrssystems CargoCap“ umfasst zwei wesentliche Projektbestandteile: die maschinenbauliche Weiterentwicklung der Verzweigungstechnik sowie die methodische Betrachtung der Fahrverbandsbildung im Umfeld von Zusammenführungen.

Im Rahmen des ersten Projektteils konnte die Verzweigungstechnik erheblich weiterentwickelt werden. So wurde auf Basis des Stands der Technik sowie eines früheren Forschungsprojekts zunächst der Weiterentwicklungsbedarf ermittelt. Für zwei grundlegende Prinzipien der Verzweigungstechnik, die sich in den Betriebslasten und der Ausnutzung des Rohrquerschnitts unterscheiden, konnte durch eine analytische Betrachtung der auftretenden Lasten anhand von Beispielen jeweils eine betriebsoptimale Anordnung der Weichenmodule ermittelt werden. Zugleich wurde untersucht, inwieweit die Verzweigungstechnik auch unter ungünstigen Anordnungen des Fahrzeuggesamtsschwerpunkts ihre Funktionsfähigkeit sicherstellt. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde ein Mehrkörpermodell eines 1:1-Fahrzeugs erstellt, das in einer Fahrrohrleitung mit 2,0 m Innendurchmesser eingesetzt werden kann. Mit diesem wurden Last-Zeit-Verläufe für die Verzweigungsdurchfahrt unter Variation verschiedener Einflussparameter simuliert. Um die grundsätzlichen Verläufe validieren zu können, wurde ein weiteres, vergleichbares Modell für ein Modellstreckenfahrzeug erstellt, für das sich bei Verzweigungsdurchfahrt grundsätzlich ähnliche Last-Zeit-Verläufe ergeben. An der Modellstrecke wurden Messungen an einem Modellstreckenfahrzeug durchgeführt, das mit speziellen Weichenmodulen ausgestattet wurde, die eine messtechnische Erfassung der Lasten bei Verzweigungsdurchfahrt ermöglichen. Hierzu wurde die Modellstrecke um einen Verzweigungsprüfstand erweitert. Die grundsätzlichen Last-Zeit-Verläufe der 1:1-Fahrzeuge konnten mithilfe dieses Vorgehens indirekt validiert werden. Allerdings haben die Messergebnisse auch neue Fragestellungen aufgeworfen, denn die Weichenarme werden unterschiedlich stark belastet. Dies ist auf ein Querspiel des Fahrzeugs innerhalb der Strecke zurückzuführen. Um dieses Betriebsverhalten abzubilden und geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten, ist in näherer Zukunft eine weitere Detaillierung der MKS-Modelle erforderlich. Eine genauere Betrachtung der in diesem Zusammenhang noch offenen Fragestellungen findet im Rahmen einer Dissertation statt, die voraussichtlich noch im laufenden Jahr abgeschlossen wird.

Auf Basis einer patentierten Prinziplösung wurde ein schaltendes Weichenmodul für die Modellstrecke entwickelt. Zunächst wurde dessen Schaltverhalten analysiert und relevante Systemfunktionen optimiert. Nach einer Einbindung in die Fahrzeugsteuerung konnte anschließend das Gesamtsystem aus Fahrzeug und streckenseitigen Führungsschienen untersucht werden und so erste Erkenntnisse für den Weiterentwicklungsbedarf hinsichtlich einer Erstanwendung gesammelt werden. Desweiteren wurde eine unterstützende Weichenmodulbetätigung entwickelt und erprobt, die es bei einer dichten Abfolge von Verzweigungen und Zusammenführungen ermöglicht, die Weichenmodule punktgenau durch streckenseitige Führungselemente umzuschalten.

Der Projektteil „Methodische Betrachtung der Fahrverbandsbildung im Umfeld von Verzweigungen“ ist steuerungstechnisch orientiert und umfasst im Wesentlichen die Weiterentwicklung der Software und deren Erprobung. So wurde die auf dem Fahrzeug befindliche Steuerungssoftware um einen Sicherheitsmechanismus ergänzt, der die Kollision von Fahrzeugen vermeidet, auch wenn einzelne Fahrzeugrechner ausfallen. Ein weiterer Fokus lag auf der Optimierung der Ortung. Desweiteren mussten die Softwarebestandteile zur Ansteuerung der Antriebe angepasst werden, sodass das Fahrzeug zur Verzweigungsdurchfahrt nun über ein elektronisches Sperrdifferential verfügt.

Auch die Leitstandssoftware wurde weiterentwickelt. In diesem Zusammenhang entstand ein Streckeneditor, mit dem in den Leitstand einzubindende Streckennetze erstellt werden können. Diese Netze enthalten die für eine Strecke relevanten in Form von Verzweigungen und Zusammenführungen, Stationen und RFID-Tags zur Ortung. Auf dieser Basis kann im Zusammenhang mit der Erteilung eines Fahrtauftrags an ein Fahrzeug durch die übergeordnete Leitstandsebene eine Route berechnet werden, die an das CargoCap per Netzwerk übertragen wird.

Darüber hinaus wurde ein Fahrzeugsimulator entwickelt, der ursprünglich der Erprobung der Abstandsregelung diente und im Rahmen dieses Projektes hinsichtlich der Zusammenführungsregelung angepasst worden ist.

Für die Fahrzeugsoftware wurden für die Zusammenführungsregelung Ziele definiert. Dies sind die systematische und die fahrzeugdynamische Sicherheit, der zu erzielende Durchsatz, die Energieeffizienz und die Pünktlichkeit. Auf dieser Basis wurden existente Longitudinalregelungen hinsichtlich der Verwendbarkeit bei CargoCap analysiert und bewertet. Übergeordnete Systeme der Verkehrsflussregelung, die insbesondere in größeren Streckennetzwerken zum Einsatz kommen, wurden mithilfe von Simulationen hinsichtlich der Verwendbarkeit bei CargoCap beleuchtet. Die versuchstechnische Verifikation der Zusammenführungsregelung erfolgte durch Versuche an der Modellstrecke in einer Hardware-in-the-loop-Umgebung. In diesem Zusammenhang wurde zunächst die Modellstrecke per neu erstelltem Streckeneditor um hineinführende virtuelle Streckenäste erweitert, auf denen sich simulierte Fahrzeuge befinden. Auf den realen und den virtuellen Fahrzeugen läuft jeweils eine Software zur Zusammenführungsregelung ab. In unterschiedlichen Betriebsszenarien konnte auf diesem Weg die Funktionsfähigkeit der Zusammenführungsregelung nachgewiesen werden.

Im Rahmen des bearbeiteten Forschungsprojektes wurde die Technik von CargoCap maßgeblich weiterentwickelt und das Systemwissen deutlich erweitert. Das CargoCap-System wurde somit einen großen Schritt näher an die Realisierung herangeführt. Die im Rahmen des Projektes gesammelten Erkenntnisse lassen sich grundsätzlich auch auf andere autonome Verkehrs- und Logistiksysteme übertragen.

Um CargoCap in der Praxis umzusetzen, muss das derzeit als Prototyp vorhandene System auf den 1:1-Maßstab angepasst werden und hinsichtlich der in einem solchen System wirkenden Lasten dimensioniert werden. Besondere Aufmerksamkeit ist hierbei auf das Fahrwerk zu richten, das bislang nur unter funktionellen Gesichtspunkten für den Modellstreckenbetrieb konzipiert wurde. Schwingungsmessungen zeigen hier den Bedarf auf, die fahrdynamischen Eigenschaften zu verbessern.

Ein Ansatz wäre die Anbindung der Räder und Spurführungen über geeignete Feder-Dämpfer-Systeme.

Hierbei ist auch die Querdynamik zu berücksichtigen. Einerseits sind Stöße aus Einlauf in eine Verzweigung oder aus Kurveneinfahrt möglichst abzufangen, andererseits sollte das System aber auch keine unzulässigen Auslenkungen in Querrichtung oder um die Fahrzeuglängsachse aufweisen. In das Gesamtsystem des Fahrwerks sind auch die Weichenmodule zu integrieren, die, derzeit als Prototypen vorhanden, hinsichtlich der erweiterten Anforderungen eines realen Systems zu gestalten und auszulegen sind.

Die vorhandene Software hat sich für den Einsatz an der Modellstrecke bewährt. Vor einem Einsatz in einer realen Anwendung ist diese auf die dann veränderte Hardware und die geänderten Randbedingungen anzupassen und auf einen Industriestandard zu bringen, der stets die notwendige System- und Ausfallsicherheit gewährt.

7 Literaturverzeichnis

[Hohaus2009] Hohaus, L.: Entwicklung einer Verzweigungsvorrichtung für das System CargoCap, simulationsgestützte Ermittlung von Betriebslasten. Dissertation Ruhr-Universität Bochum 2009. ISBN 3-89194-188-9

[Hölscher2012] Hölscher, H.: CargoCap – Optimale Koordinierung der Fahrbewegungen autonomer Fahrzeuge im lokalen Umfeld von Verzweigungen und Zusammenführungen. Dissertation Ruhr-Universität Bochum 2012. ISBN 3-89194-202-8

[Knüpfer2009] Knüpfer, P.: CargoCap – Optimale Fahrbewegungen autonomer Fahrzeuge. Dissertation Ruhr-Universität Bochum 2009. ISBN 3-89194-189-7

[LMF2009] Ruhr-Universität Bochum: Lehrstuhl für Maschinenelemente und Fördertechnik: Abschlussbericht des Forschungsvorhabens „Optimierung des unterirdischen Güterverkehrssystems CargoCap zur Gewährleistung eines energieeffizienten Betriebs“. Im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. DBU: Az 24592-23. Bochum 2009

[Schmitt2011] Schmitt, M.: CargoCap – Einfluss der Aerodynamik auf den Energiebedarf eines unterirdischen Transportsystems. Dissertation Ruhr-Universität Bochum 2011. ISBN 3-89194-197-8

[Schmitz2013] Schmitz, M.: Entwicklung eines grafischen Logistiksystems mit Streckenerstellung und Routenplanung. Masterarbeit im Rahmen des Projekts. Ruhr-Universität Bochum. AG Baumaschinen und Fördertechnik 2013

[Stein2009] Stein, D.: CargoCap – Automatischer Gütertransport im Untergrund, Marktpotentialanalyse am Beispiel einer Ruhrgebietstrasse. Abschlussbericht Bochum 2009

[Visaplan2011] Grafiken zu CargoCap, Visaplan GmbH Bochum 2011

[Wagner_Hohaus_2002] Wagner, G.; Kraft, G.; Haensel, H.; Hohaus, L.; Hetz, M.: Verzweigungsvorrichtung für spurgeführte Fahrzeuge. Offenlegungsschrift DE 100 35 0170 A1. Deutsches Patent- und Markenamt München 2002

[Wagner_Aldejohann_2012] Wagner, G.; Aldejohann, S.: Verzweigungsmechanismus für spurgeführte Fahrzeuge. Offenlegungsschrift DE 10 2011 101 401 A1. Deutsches Patent- und Markenamt München 2012

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: CargoCap Fahrzeug in Fahrrohrleitung [Visaplan_2011]	5
Abbildung 3.2: Vergleich der Durchmesser U-Bahn-Tunnel und CargoCap-Fahrrohrleitung [Visaplan2011]	6
Abbildung 3.3: Die Modellstrecke.....	7
Abbildung 4.1: Modellstreckenfahrzeug mit nicht schaltenden Weichenmodulen innerhalb des Verzweigungsprüfstands.....	17
Abbildung 4.2: Messstellen am Weichenarm mit DMS für Zug-Druck-Belastung sowie Biegebelastung (links); Fahrzeug mit Weichenarm mit applizierter Messstelle (rechts)..	18
Abbildung 4.3: Figur1 des Patents: Weichenmodul-Prinziplösung Draufsicht.....	20
Abbildung 4.4: Figur 2 des Patents: Weichenmodul-Prinziplösung Vorderansicht.....	20
Abbildung 4.5: Figur 3 des Patents: Zwei Fahrzeuge innerhalb Verzweigung mit unterschiedlichen Fahrtrichtungen.....	21
Abbildung 4.6: Modellstreckenfahrzeug mit schaltenden Weichenmodulen und Verzweigungsprüfstand (im Hintergrund) sowie Be-/Entladung einer Modellpalette	23
Abbildung 4.7: Notwendigkeit einer unterstützenden Weichenmodulbetätigung.....	24
Abbildung 5.1: Abweichungen bei Positionsbestimmung durch Drehgeber (links) und RFID-Ortungssystem (rechts)	30
Abbildung 5.2: Zusammenhang der Softwarekomponenten Streckeneditor, Leitstand und Fahrzeugsimulator/Fahrzeugfirmware.....	33