

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für
Fördertechnik Materialfluss Logistik

**Kommunikationskonzept für
selbststeuernde Fahrzeugkollektive in der Intralogistik**

Peter Tenerowicz-Wirth

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

Die Dissertation wurde am 19. November 2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 14. Februar 2013 angenommen.

Peter Tenerowicz-Wirth

**Kommunikationskonzept für
selbststeuernde Fahrzeugkollektive
in der Intralogistik**

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner
Technische Universität München

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich:

Dissertation. München: Technische Universität München, 2013

ISBN: 978-3-941702-33-2

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Copyright © Peter Tenerowicz-Wirth 2013

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Layout und Satz: Peter Tenerowicz-Wirth

Printed in Germany 2013

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (**fml**) der Technischen Universität München. Mein Dank gilt daher in erster Linie meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner, der mir durch sein Vertrauen und seine Unterstützung die Durchführung meines Promotionsvorhabens ermöglicht hat. Weiterhin danke ich Frau Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser für die Übernahme des Koreferats und das Interesse an meiner Arbeit sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Kommunikationskonzept für selbststeuernde Fahrzeugkollektive entwickelte ich im Rahmen des Forschungsprojekts „Algorithmen und Kommunikationssysteme für die Zellulare Fördertechnik“. Für die fruchtbare Zusammenarbeit in diesem Projekt möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Hubert Büchter vom Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund bedanken. Auch danke ich den beteiligten Industriepartnern für die Unterstützung meiner Forschungsarbeit.

Darüber hinaus gilt ein besonderer Dank allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl **fml** für das jederzeit angenehme, freundschaftliche und motivierende Arbeitsklima. Ein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang meinen Bürokollegen, von denen ich Herrn Dr.-Ing. Dennis Walch, Herrn Thorsten Frenz, Herrn Oliver Schneider, Herrn Dr.-Ing. Razvan Chisu, Herrn Dr.-Ing. Florian Kuzmany, Herrn Dominik Stockenberger und Frau Janina Durchholz namentlich hervorheben möchte. Nicht zuletzt danke ich auch allen Angestellten des Lehrstuhls, die mir stets hilfsbereit zur Seite standen.

Mein persönlicher Dank gilt meiner Mutter Regina für ihre immerwährende Unterstützung und Förderung in allen Bereichen meines Lebenswegs, insbesondere auch meines beruflichen Werdegangs. Mein Vater Adolf Tenerowicz konnte den Abschluss meiner Arbeit leider nicht mehr miterleben, doch aus der Erinnerung an ihn und seinen langjährigen Beistand konnte ich viel Kraft ziehen. Schließlich gilt mein Dank meiner wunderbaren Ehefrau Birgit, die mich geduldig und unermüdlich unterstützt hat und mir ein großer Rückhalt ist.

München, im März 2013

Peter Tenerowicz-Wirth

Kurzzusammenfassung

Globalisierte Beschaffungsmärkte, eine zunehmende Produktindividualisierung und Variantenvielfalt sowie kürzer werdende Innovationszyklen steigern die Komplexität und Dynamik in logistischen Systemen. Dies trifft insbesondere auf Knoten in Distributionsnetzen zu, in welchen Waren gebündelt, auftragsspezifisch zusammengestellt und weiterverteilt werden. Eine wachsende Artikelanzahl, kleine Losgrößen sowie stark schwankende und daher schwer prognostizierbare Auftragseingänge verstärken den logistischen Zielkonflikt zwischen maximaler Lieferbereitschaft und minimalem Bestand.

Vor diesem Hintergrund gewinnt bei der Gestaltung von Materialflusssystemen deren schnelle Anpassbarkeit an sich ändernde Randbedingungen und somit ein hoher Grad an Wandelbarkeit an Bedeutung. Dezentrale, flexible und adaptive Lösungen bei der Steuerung von Material- und Informationsfluss wie das „Internet der Dinge in der Intralogistik“ weisen bereits in diese Richtung. Gleichzeitig werden seitens der Mechanik jedoch weiterhin heterogene, ortsfeste Stetigfördersysteme eingesetzt. Um die Vorteile der Dezentralisierung hinsichtlich Flexibilität, Robustheit und Wiederverwendbarkeit nicht nur im Bereich der Software nutzen zu können, untersucht die vorliegende Arbeit die Potenziale einer konsequenten Substitution starrer, unflexibler Fördertechnik durch Kollektive aus einheitlichen, frei navigierenden Transportrobotern, die logistische Aufgaben autonom erfüllen können.

Dabei fokussiert die vorliegende Arbeit einen sicheren und effizienten Austausch bedarfsgerechter Informationen zwischen den beteiligten Einheiten, welcher die Grundvoraussetzung für den Betrieb eines auf autonom agierenden, mobilen und räumlich verteilten Entitäten basierenden Materialflusssystems darstellt. Es werden sowohl technische als auch logische Aspekte eines Kommunikationskonzepts für selbststeuernde Fahrzeugkollektive in der Intralogistik betrachtet.

Abstract

Globalized procurement markets, increasing product customization and variety, and shorter innovation cycles increase the complexity and dynamics in logistics systems. This is particularly true at the node in distribution networks, in which goods are combined, compiled order-specifically and redistributed. A growing number of products, small batch sizes and highly variable orders, which are therefore difficult to predict, reinforce the logistics trade-off between maximum delivery and minimal inventory.

Against this background, a rapid adaptivity and thus a high degree of changeability in the design of material flow systems becomes more and more important. Decentralized, flexible and adaptive solutions for the management of material and information flows - as the "Internet of Things in Intralogistics" - already point in this direction. At the same time, the material flow is still based on heterogeneous, stationary continuous conveyor systems. To not only use the advantages of decentralization regarding flexibility, robustness and reusability in the field of software, the present thesis investigates the potential of a systematic substitution of rigid, inflexible conveyor technique by a large number of uniform, mobile transport robots, which can carry out logistic tasks autonomously.

The present thesis focuses a safe and efficient exchange of required information between the participating units, which is the basic requirement for the operation of a material flow system based on autonomous, mobile and geographically distributed entities. Both technical and logical aspects of a communication concept for autonomously controlled vehicular collectives in intralogistics are considered.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Forschungsfragen und Zielsetzung der Arbeit	4
1.3	Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	6
2	Eingrenzung der Anwendungsdomäne Intralogistik	9
2.1	Konventionelle Materialflusssysteme	9
2.1.1	Prozesse und Funktionen der Intralogistik	10
2.1.2	Förder- und Materialflusstechnik	13
2.1.3	Materialflussteuerung	17
2.2	Gestaltungsgrundlagen wandelbarer Materialflusssysteme	21
2.2.1	Der Begriff der Wandelbarkeit	22
2.2.2	Funktionsorientierte Modularisierung	24
2.2.3	Dezentrale Materialflussteuerung	25
2.2.4	Wirtschaftlichkeit wandelbarer Materialflusssysteme	31
2.2.5	Praktische Umsetzungen wandelbarer Materialflusssysteme	32
3	Grundlagen und relevante Anwendungen der Kommunikationstechnik	41
3.1	Kommunikationsmodelle	41
3.2	Kommunikation in Fahrerlosen Transportsystemen	47
3.3	Car-to-X-Kommunikation	48
4	Selbststeuernde Fahrzeugkollektive in der Intralogistik	53
4.1	Aufbau und Funktionsweise	53
4.2	Eignung für Prozesse der Intralogistik	58
4.2.1	Anwendungsabhängige Ausstattung der Einzelfahrzeuge	60
4.2.2	Bereichsübergreifender Einsatz	61
4.3	Informationsbedarf zur Selbststeuerung eines Fahrzeugkollektivs	63
4.3.1	Informationen der Materialflussteuerung	64
4.3.2	Klassifizierung relevanter Informationsarten	67
4.3.3	Fazit	70
4.4	Referenzszenarien	71

4.4.1	Elektrohängebahnanlage	71
4.4.2	Logistikprozesse eines Distributionszentrums	73
4.5	Zusammenfassung	75
5	Kommunikationskonzept für autonome mobile Fördertechnikmodule	77
5.1	Anforderungsanalyse	77
5.1.1	Prozessbedingte Anforderungen der Intralogistik	78
5.1.2	Anforderungen an das Kommunikationssystem	80
5.1.3	Zusammenfassung der Anforderungen	86
5.2	Technisches Kommunikationskonzept	87
5.2.1	Kommunikationsstandards	88
5.2.2	Datenformate	97
5.2.3	Fazit	100
5.3	Logisches Kommunikationskonzept	101
5.3.1	Einsatz eines Blackboardsystems	102
5.3.2	Parallelbetrieb verteilter Blackboards	112
5.3.3	Fazit	120
5.4	Gesamtkonzept für die Kommunikation in selbststeuernden Fahrzeugkollektiven	121
5.4.1	Verortung des Agentensystems auf zentralem Server	121
5.4.2	Verortung der Softwareagenten auf autonomen Flurförderzeugen	122
5.5	Zusammenfassung	125
6	Realisierung und Validierung des logischen Kommunikationskonzepts	127
6.1	Implementierung eines verteilten Blackboardsystems	127
6.2	Analyse des Kommunikationsverhaltens	129
6.3	Analytische Vergleichsrechnung	132
6.4	Bewertung der Untersuchungsergebnisse	136
7	Zusammenfassung und Ausblick	137
7.1	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse	137
7.2	Ausblick	140
	Literaturverzeichnis	143
	Abbildungsverzeichnis	158
	Tabellenverzeichnis	160

Verwendete Abkürzungen

AGV	Automated Guided Vehicle
AMS	Agent Management System
AutoID	Automatische Identifikation
BB	Blackboard
BB ₁	Single Blackboard System
BB _d	Distributed Blackboard System
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BIP	Brutto-Inlandsprodukt
CAN	Controller Area Network
DB	Datenbank
DF	Directory Facilitator
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DSRC	Dedicated Short Range Communications
EHB	Elektrohängebahn
ERP	Enterprise Resource Planning
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
FIRA	Federation of International Robot-Soccer Association
FTP	File Transfer Protocol
FTS / FTF	Fahrerloses Transportsystem / Fahrerloses Transportfahrzeug
GLT	Großladungsträger
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
IP	Internet Protocol
ISA	International Society of Automation
ISO	Internationale Organisation für Normung
ITS	Intelligent Transport Systems
JADE	Java Agent Development (Framework)

Verwendete Abkürzungen

KI	Künstliche Intelligenz
KLT	Kleinladungsträger
LAM	Lastaufnahmemittel
LAN	Local Area Network
LVS	Lagerverwaltungssystem
MDT	Mobile Data Terminal / Mobiles Datenterminal
MFR	Materialflussrechner
MzW	Bereitstellprinzip Mann-zur-Ware
OOP	Objektorientierte Programmierung
OSI	Open Systems Interconnection
P2P	Peer-to-Peer
PC	Personal Computer
PROFIBUS	Process Field Bus
QVW	Querverschiebewagen
RBG	Regalbediengerät
RFID	Radio Frequency Identification
SCM	Supply Chain Management
SMM	Social Media Marketing
SPOF	Single Point Of Failure
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Structured Query Language
TCP	Transmission Control Protocol
TE	Transporeinheit
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UDP	User Datagram Protocol
VANET	Vehicular Ad-hoc Network
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
WAVE	Wireless Access for Vehicular Environment
WLAN	Wireless Local Area Network
WMS	Warehouse Management System
WWS	Warenwirtschaftssystem
WzM	Bereitstellprinzip Ware-zum-Mann
XML	Extensible Markup Language

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Logistische Systeme sehen sich steigenden Anforderungen ausgesetzt. Im Zuge der weltweiten Vernetzung der Märkte – allgemein als *Globalisierung* bezeichnet – sehen sich deutsche Unternehmen mit einem wachsenden Konkurrenzangebot insbesondere aus Niedriglohnländern konfrontiert. Seit dem Jahr 1995 hat sich der Wert der Warenexporte aus den Industrienationen mehr als verdoppelt, bei den sogenannten BRIC-Staaten Brasilien, Russland, Indien und China stieg der Wert der exportierten Güter um den Faktor acht an [Fit-2012]. Diese Entwicklung steigert den Kosten- und Zeitdruck auf die Unternehmen, die gerade in den gesättigten Käufermärkten der Industriestaaten einem harten Verdrängungswettbewerb ausgesetzt sind. Gleichzeitig profitiert Deutschland als Exportnation von der Erschließung neuer Absatzmärkte, gerade in sogenannten *emerging markets (aufkommende Märkte)* wie den BRIC-Staaten, Südafrika oder einigen Staaten Osteuropas. Das steigende Welthandelsvolumen verursacht ein wachsendes Aufkommen an Transport- und Umschlagprozessen. Der Anstieg des globalen Handelsaufkommens führt zu steigenden Anforderungen an logistische Netzwerke bzgl. Flexibilität, Dynamik und Komplexitätsbeherrschung. Zudem können sich im weltweiten Wettbewerb Unternehmen in Hochlohnländern wie Deutschland nur durch innovative, hochqualitative Produkte und Dienstleistungen sowie durch einen hohen Grad der Prozessautomatisierung behaupten. Dies betrifft Hersteller und Betreiber innerbetrieblicher Materialflusssysteme gleichermaßen.

Eine große Herausforderung erwächst den Herstellern zudem aus dem verstärkt auftretenden Kundenwunsch nach auf seine Bedürfnisse zugeschnittenen Produkten. Als Reaktion auf dieses Käuferverhalten und zur Differenzierung im Wettbewerb setzen Hersteller von Massenprodukten verstärkt auf eine kundenindividuelle Massenproduktion (*mass customization*), bei der das vom Kunden individuell gestaltete Produkt zusammen mit anderen Produkten in einem einheitlichen Produktionsablauf hergestellt wird. Kundenindividuelle Aufträge führen zu einer Verringerung der Fertigungslosgrößen und zu einem erhöhten Aufkommen an Stückguttransporten, welche die einzelnen Fertigungs- und Montageschritte verknüpfen bzw. versorgen. Gleichzeitig wird das Produktangebot in immer kürzeren Zeitabständen erneuert, um

den rasch voranschreitenden Marktanforderungen gerecht zu werden. Dies bedingt kurze Innovationszyklen und große Sortimentsumfänge.

Ein weiterer Trend, der die Anforderungen an Logistiksysteme beeinflusst, ist der anhaltende Siegeszug des Internets und eine Digitalisierung sowohl des täglichen Lebens als auch der inner- und interbetrieblichen Prozesse. Für Privatpersonen wie für Unternehmen stellt das Internet mittlerweile eine globale Plattform zur Beschaffung von Informationen und Gütern dar. Durch diese Entwicklung hat sich das Konsumverhalten der Privathaushalte in den letzten Jahren stark gewandelt. 69 Prozent der Deutschen im Alter von 14 bis 64 Jahren kauften nach eigenen Angaben 2011 im Internet ein [IFD-2011]. Gleichzeitig ist die mobile Nutzung des Internets auf dem Vormarsch. Der Absatz internetfähiger Smartphones stieg in Deutschland im Jahr 2011 um 36 Prozent auf mehr als 10 Millionen Stück an [BIT-2011]. Das Internet bietet dem Konsumenten im Rahmen des E-Commerce Zugang zu einem nahezu unbegrenzten Produktangebot und gleichzeitig die Möglichkeit, Eigenschaften und Preise verschiedener Produkte und Anbieter online zu vergleichen und die Waren anschließend direkt zu bestellen. Nach dem Kauf eines Produkts erwartet der Kunde in vielen Fällen eine sehr kurze Lieferzeit (*Sofortness*). Der Erfüllungsgrad dieser Erwartungshaltung fließt in seine Beurteilung des Händlers und somit in seine künftigen Kaufentscheidungen ein. An das Produkt selbst stellt der Konsument hohe Qualitätsansprüche. Eine Nichterfüllung dieser Ansprüche kann zur Abwanderung des Kunden führen. Die Markentreue nimmt als Folge des vereinfachten Zugangs zu konkurrierenden Ersatzprodukten ab.

Die zunehmende Nutzung sozialer Medien (Blogs, Foren, Wikis, soziale Netzwerke) verstärkt diesen Trend. Betrifft der Meinungs austausch unter den Internetnutzern bestimmte Konsumgüter, so wird die Entscheidung über den Kauf eines konkreten Produkts positiv oder negativ beeinflusst. Diesen Effekt macht sich die Werbewirtschaft zunutze, wenn sie neben klassischem Online-Marketing (z.B. Bannerwerbung, Werbeeinblendungen) gezielt soziale Medien nutzt, um durch Beiträge oder unterhaltsame Videos ihre Werbebotschaft zu verbreiten (*Social Media Marketing*, SMM). Eine erfolgreiche Werbekampagne oder ein Produkthype aus den Reihen der Internetnutzer kann bei Herstellern und Händlern zu einer kurzfristig stark gesteigerten Nachfrage nach dem entsprechenden Produkt führen. Sprunghafte Nachfrageschwankungen stellen eine große Herausforderung für die mit dem Auslieferprozess verbundenen Logistikprozesse dar.

Globalisierte Märkte und Wertschöpfungsnetze sowie eine Digitalisierung von Einkaufs- und Vertriebsprozessen führen zu Verschiebungen ökonomischer, rechtlicher und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen. Darauf müssen Unternehmen mit einer Neuausrichtung ihres Handelns reagieren. Diese Neuausrichtung umfasst auch das Hinterfragen etablierter Logistikprozesse. Für global agierende und stark vernetzte Unternehmen aus Produktion und Handel ist die Logistik seit geraumer Zeit von einer reinen Unterstützungsfunktion zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor avanciert. Ein erzielter Jahresumsatz von etwa 200 Milliarden Euro im Jahr 2009 und eine Beschäftigtenzahl von ca. 2,6 Millionen unterstreichen die volkswirtschaftliche Relevanz der Logistikbranche in Deutschland [Kla-2010]. Neben den Prozessen makrologistischer Netzwerke gilt es auch die aktuell vorherrschenden innerbetrieblichen Logistikprozesse unter Berücksichtigung der beschriebenen Rahmenbedingungen zu überdenken und angemessen zu gestalten.

Der hohe Innovationsdruck, dem die Unternehmen ausgesetzt sind, sowie der Kundenwunsch nach individualisierten Produkten generieren neue Anforderungen an die Intralogistik. Verkürzte Innovationszyklen und die damit verbundenen kürzeren Lebenszyklen einzelner Produktgenerationen bedingen eine schwer beherrschbare Variantenvielfalt, einen wachsenden Sortimentsumfang und wachsende Artikelzahlen innerhalb von Distributionsnetzwerken. Gleichzeitig ist eine Verteilung der Auftragsgänge zunehmend schwierig zu prognostizieren [See-2005]. Diese Entwicklungen führen in den Knoten von Distributionsnetzwerken mit ihren Aufgaben der auftragsgerechten Kommissionierung und Verteilung von Waren zu einem kritischen Anstieg an Komplexität und Dynamik. In Konsequenz müssen innerbetriebliche Logistikprozesse flexibel und wandelbar gestaltet werden, um kurzfristig auf unvorhergesehene Anforderungen reagieren zu können. Aufgrund des hohen Kosten- und Zeitdrucks gilt es, eine gesteigerte Flexibilität im Materialflusssystem mit einem hohen Automatisierungsgrad in Einklang zu bringen und den Zielkonflikt zwischen maximaler Lieferbereitschaft und minimalem Bestand so weit als möglich aufzulösen. Um diesen breit gefächerten Anforderungen angemessen zu begegnen, werden in Industrie und Forschung verstärkt innovative Konzepte zur wandelbaren Gestaltung von Materialflusssystemen verfolgt. Gemeinsames Ziel dieser Bestrebungen ist es, Materialflusssysteme bei Bedarf mit geringem Aufwand über die zum Zeitpunkt ihrer Inbetriebnahme geplanten Leistungsgrenzen hinaus zu skalieren.

Ein vielversprechender und bereits weit vorangeschrittener Ansatz fordert eine Dezentralisierung der Materialflussteuerung und die Befähigung logistischer Objekte

zur Selbststeuerung in Logistiksystemen nach dem Prinzip eines *Internet der Dinge* (vgl. [Gün-2010a] und Abschnitt 2.2.3). Dieses Paradigma setzt auf autonome Fördertechnikmodule anstelle einer hierarchischen, zentralisierten Steuerung und verlagert nach dem Motto „*Teile und herrsche*“ einen Großteil der Entscheidungskompetenz auf niedrige, anlagennahe Ebenen. Softwarekonzepte wie Agentensysteme und Technologien wie RFID (*Radio Frequency Identification*) leisten einen Beitrag zur Umsetzung dieses innovativen Steuerungskonzepts, indem sie effektive und flexible Steuerungsmechanismen ermöglichen und den Materialfluss verstärkt mit dem zugehörigen Informationsfluss verknüpfen. Eine genaue und aktuelle Abbildung der realen Güterströme in den Informationssystemen ist gerade bei sich schnell ändernden Abläufen und Sortimenten von zunehmender Bedeutung. So wachsen auch die Vorteile einer prozessnahen, dezentralen Datenhaltung und selbststeuernder Materialflusssysteme mit steigender Dynamik und Komplexität der abzubildenden Prozesse [Hom-2004; Gün-2006a; Sch-2007a].

Von der Dezentralisierung und Modularisierung komplexer Materialflusssysteme versprechen sich Forscher wie Anwender eine einfache Erweiterbarkeit (bzw. Skalierbarkeit) der Anlagenfunktionalität sowohl auf mechanischer als auch auf steuerungstechnischer Ebene nach dem Plug-and-Play-Prinzip sowie Kostenvorteile bei Planung, Realisierung und Inbetriebnahme fördertechnischer Anlagen [Gün-2008a; May-2009; Kuz-2010; Nop-2011]. Ein technischer Ansatz, um zukünftige Fördertechniksysteme möglichst wandlungsfähig zu gestalten, sieht die Substitution starrer Fördertechnikmodule durch mobile Transportroboter vor, welche autonom oder kooperativ ihre logistischen Aufgaben erfüllen [Hom-2006a; Gün-2008b; Ten-2011]. Diese selbststeuernden Fahrzeugkollektive stellen die Idealform wandlungsfähiger Materialflusssysteme für ein *Internet der Dinge in der Intralogistik* dar, da sie in hohem Grade layoutflexibel und skalierbar sind. Kapitel 4 dieser Arbeit widmet sich dieser neuartigen Kategorie fördertechnischer Systeme als Antwort auf die steigenden Anforderungen hinsichtlich Anpassbarkeit und Skalierbarkeit, denen Materialflusssysteme zukünftig genügen müssen.

1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung der Arbeit

Für die Substitution herkömmlicher, starrer Fördertechnik durch frei fahrende, sich selbst steuernde Fahrzeuge, die in der Lage sind, logistische Funktionen zu erfüllen, existieren bereits erste Ansätze in Industrie und Forschung (vgl. Abschnitt 2.2.5).

Jedoch sind diese Systeme auf externe Unterstützungsfunktionen, wie beispielsweise Wegmarken zur Navigation (z.B. Transponderraster im Boden) oder aufbereitete, komprimierte Steuerungsinformationen, angewiesen. Im Gegensatz dazu sollen die in dieser Arbeit betrachteten selbststeuernden Fahrzeugkollektive in der Lage sein, ihre logistischen Aufgaben mit einem sehr geringen Maß an Unterstützungsfunktionen zu erfüllen. Aus dieser Anforderung lässt sich eine erste grundsätzliche Fragestellung ableiten:

1. Lassen sich Funktionen der Intralogistik durch ein aus mobilen Robotern bestehendes Fahrzeugkollektiv realisieren?

Zur Beantwortung dieser Fragestellung erfolgt zunächst aufbauend auf dem Stand der Technik eine Untersuchung des zugrunde liegenden Funktionsprinzips. Anschließend werden die systemimmanenten Eigenschaften eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs den prozessualen Anforderungen der Intralogistik gegenübergestellt (vgl. Kapitel 4.1 und 4.2).

Grundvoraussetzung für den Betrieb eines auf autonom agierenden, mobilen und räumlich verteilten Entitäten basierenden Materialflusssystemes ist ein sicherer und effizienter Austausch bedarfsgerechter Informationen zwischen den beteiligten Einheiten. Entsprechend lassen sich zwei weitere Forschungsfragen für die vorliegende Arbeit formulieren:

2. Welchen Informationsbedarf weisen die autonomen Fahrzeuge auf?

Der für den Betrieb eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs notwendige Informationsaustausch wird untersucht. Zudem erfolgt eine Klassifizierung der innerhalb eines selbststeuernden Materialflusssystemes vorhandenen Informationen nach den Kriterien Datenmenge, Zeitvorgaben, Bedarfshäufigkeit und Anzahl der Empfänger, um Grundlagen für eine sinnvolle technische und logische Gestaltung des Kommunikationskonzepts zu sammeln (vgl. Kapitel 4.3).

3. Wie können die benötigten Daten effizient und sicher ausgetauscht werden?

Es werden Datenübertragungstechnologien, Datenformate und Kommunikationsprotokolle ermittelt, die sich in besonderem Maße für den Datenaustausch innerhalb eines verteilt agierenden, sich selbst organisierenden Kollektivs von Flurförderzeugen eignen. Für die unterschiedlichen Informationskategorien werden differenzierte Lösungsansätze entwickelt (vgl. Kapitel 5).

Ziel dieser Arbeit ist somit die Entwicklung eines anforderungsgerechten Kommunikationskonzepts für die Koordination, Kooperation und Kollisionsvermeidung autonomer Fahrzeuge in einem innerbetrieblichen Umfeld sowie für die datentechnische Anbindung des Fahrzeugkollektivs an weitere assoziierte Kommunikationspartner (Übergabestationen, Auftragsmanagementsysteme, Ladestationen etc.).

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die Entwicklung eines Kommunikationssystems für selbststeuernde Flurförderzeuge in der Intralogistik folgt den in Abbildung 1-1 dargestellten Schritten. Zunächst werden in ►Kapitel 2 die erforderlichen Grundlagen und Begrifflichkeiten definiert, die dieser Arbeit zugrunde liegen. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Domäne *Intralogistik*, da diese den Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit darstellt. Typische Eigenschaften, prozessbedingte Anforderungen und aktuelle Trends dieser Anwendungsdomäne grenzen das Einsatzfeld des zu entwickelnden Kommunikationskonzepts ein.

Ein weiteres Kapitel (►Kapitel 3) befasst sich mit den Grundlagen der Kommunikationstechnik sowie dem Datenaustausch in Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) und zwischen Kraftfahrzeugen in sogenannten *Vehicular Ad-hoc Networks* (VANET). Beide Anwendungsfelder weisen Ähnlichkeiten zu selbststeuernden Fahrzeugkollektiven auf, sodass die dort verwendeten Technologien und Protokolle Lösungsansätze für das angestrebte Kommunikationskonzept liefern können.

►Kapitel 4 zeigt als Reaktion auf die veränderten Anforderungen an Prozesse der Intralogistik basierend auf dem vorgestellten Stand der Technik einen neuartigen Ansatz zur Realisierung von Materialflusssystemen in Form von selbststeuernden Fahrzeugkollektiven auf Basis autonomer Flurförderzeuge auf. Zudem werden zwei Referenzszenarien vorgestellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit eine zielgerichtete Konzeptentwicklung unter Berücksichtigung konkreter Einsatzbedingungen und eine abschließende Validierung der erzielten Ergebnisse erlauben.

Aufbauend auf den Anforderungen an das Kommunikationssystem und übertragbaren Lösungsansätzen aus anderen Fachgebieten erfolgt die Ausarbeitung eines Kommunikationskonzepts für selbststeuernde Fahrzeugkollektive in der Intralogistik (►Kapitel 5). Das Konzept gliedert sich in technische (*Wie unterhalten/verständigen sich die Teilnehmer?*) und logische (*Wer unterhält sich mit wem und welchem Ablauf*

folgt das Gespräch?) Aspekte. In diesem Abschnitt wird u.a. ein verteiltes Blackboardsystem (*Distributed Blackboard System*, BB_d) eingeführt, das für eine verringerte Kommunikationslast im System sorgt, gleichzeitig aber Ausfälle einzelner Kommunikationsknoten kompensieren kann und daher die erforderliche Robustheit gewährleistet. In ►Kapitel 6 wird anschließend eine Realisierung des logischen Kommunikationskonzepts vorgestellt und validiert. Im abschließenden Kapitel (►Kapitel 7) erfolgen eine Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschungs- und Anwendungsmöglichkeiten der erarbeiteten Lösung.

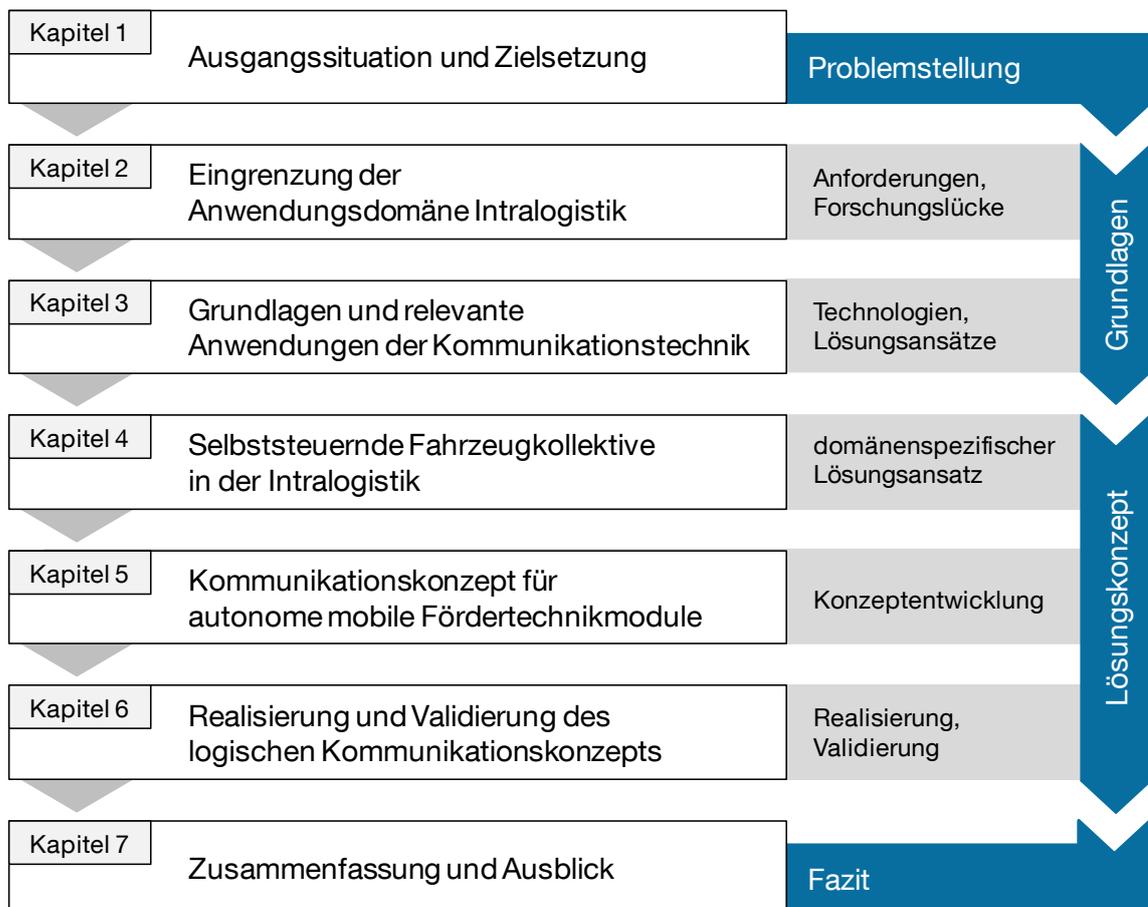


Abbildung 1-1: Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

2 Eingrenzung der Anwendungsdomäne Intralogistik

Die in dieser Arbeit entwickelte Kommunikationslösung für selbststeuernde Fahrzeugkollektive kann nicht getrennt von deren Anwendungsdomäne – den Prozessen der Intralogistik – betrachtet werden, für welche sie konzipiert ist und auf deren Gegebenheiten und Anforderungen sie beruht. Arnold grenzt die Intralogistik wie folgt ab [Arn-2006, S. 1]¹:

„Die Intralogistik umfasst die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschlags in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen.“

In diesen Grenzen sind auch die Inhalte dieser Arbeit angesiedelt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Analyse und Gestaltung der Informationsströme, die benötigt werden, um ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv zur Durchführung von Teilen des innerbetrieblichen Materialflusses zu befähigen.

2.1 Konventionelle Materialflusssysteme

Gemäß der *VDI-Richtlinie 3300* [VDI 3300] bezeichnet der Begriff *Materialfluss* „die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von stofflichen Gütern innerhalb fester Bereiche“. Realisiert werden die Materialflussvorgänge in *Materialflusssystemen*. Als Vorgänge nennt die Richtlinie konkret „*Bearbeiten, Handhaben, Transportieren, Prüfen, die Aufenthalte und die Lagerung*“ [VDI 3300].

Trotz der Bezeichnung als Materialfluss können Güter zwischen dem Eintritt in ein Materialflusssystem und dem Verlassen des Systems auch zeitweise ruhen. Versteht man die Vorgänge in Materialflusssystem allgemein als Änderungen des Zustands

¹ Ähnlich auch [Hom-2011, S. 141f] in Anlehnung an die Definition des VDMA: „*Intralogistik beschreibt den innerbetrieblichen Materialfluss, der zwischen den unterschiedlichsten ‚Logistikknoten‘ stattfindet (vom Materialfluss in der Produktion, in Warenverteilzentren und in Flug- und Seehäfen) sowie den dazugehörigen Informationsfluss [...].*“

der Güter nach Zeit, Ort, Zusammensetzung² oder Qualität³ [Jün-1989, S. 15], so entsprechen die Ruhephasen einer zeitlichen Transformation des Gutes, die der Überwindung von Zeitdisparitäten dient (z.B. zwischen Anlieferung des Gutes in einem Distributionszentrum und einem entsprechenden Auftragseingang, der das Gut beinhaltet).

Im Rahmen einer Materialflussanalyse erfolgt die Beschreibung und Darstellung des Materialflusses i.d.R. in Form von *Materialflussmatrizen* (*Von-Nach-Matrizen* [Ket-1984, S. 173]) und *Materialflussgraphen* [Pfo-2010, S. 183]. Diese Beschreibungsmodelle erlauben eine übersichtliche Darstellung von Stärke und Struktur des Materialflusses und der entsprechenden Transportintensitäten. Häufig verwendete Materialflussmatrizen sind *Adjazenz*⁴-, *Bewertungs*⁵-, *Belastungs*⁶- und *Transportmatrizen*⁷. Für die Auslegung eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs sind v.a. Bewertungs- und Transportmatrizen von Bedeutung, da diese Werte zu den Transportintensitäten und den entsprechenden Transportentfernungen liefern und dadurch die zu erbringende Transportleistung festlegen. Die zu erbringende Transportleistung hat wiederum Einfluss auf die Höhe der Materialflusskosten und somit auf die Entscheidung, ob der Einsatz eines Kollektivs aus autonomen Flurförderzeugen für den Anwendungsfall ökonomisch sinnvoll ist. Die Werte aus Materialflussmatrizen lassen sich auf Materialflussgraphen übertragen, deren Knoten die Materialquellen und -senken darstellen, während die Kanten des Graphen den verbindenden Materialflüssen zwischen den Knoten entsprechen.

2.1.1 Prozesse und Funktionen der Intralogistik

Materialflusssysteme realisieren die Prozesse der Intralogistik unter Nutzung der durch die Materialflusstechnik bereitgestellten Funktionen. Eine Betrachtung der intralogistischen Prozesse und Funktionen ist für die spätere Analyse der Einsatz-

² Unter *Zusammensetzung* wird in diesem Zusammenhang die Gruppierung oder Anordnung einzelner Stückgüter in einem Verbund verstanden.

³ *Qualität* bezeichnet den Grad der Erfüllung einer Dienstleistung, also eine Servicequalität.

⁴ *Adjazenzmatrix* – Angaben zu Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Knoten eines Graphen

⁵ *Bewertungsmatrix* – Gewichtung der Kanten eines Graphen nach Entfernung oder Zeit

⁶ *Belastungsmatrix* – Gewichtung der Kanten eines Graphen nach Durchsatz bzw. Grenzdurchsatz bezogen auf Waren/Güter

⁷ *Transportmatrix* – Gewichtung der Kanten eines Graphen nach Durchsatz bzw. Grenzdurchsatz bezogen auf Transporteinheiten (Behälter, Paletten)

möglichkeiten eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs und dem damit verbundenen Informationsbedarf der Einzelfahrzeuge von Bedeutung. Für die Einteilung und Abgrenzung grundlegender Logistikprozesse finden sich in der Literatur unterschiedliche Ansätze [Jün-1989; Arn-2009; Wil-2009; Gün-2010b]. So unterscheidet Pfohl zwischen *Kernprozessen des Güterflusses* (Transport-, Umschlags-, Lagerprozess), *Unterstützungsprozessen im Güterfluss* (Verpackungs-, Signierungsprozess) und *Prozessen des Informationsflusses* (Auftragsübermittlungs-, Auftragsbearbeitungsprozess) [Pfo-2010, S. 8]. Die Prozesse lassen sich durch entsprechende logistische Funktionen realisieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden aus der Fachliteratur folgende logistische Funktionen für eine Eingrenzung der Einsatzfelder selbststeuernder Fahrzeugkollektive (Abschnitt 4.2) übernommen:

- **Transportieren/Fördern**
Das *Transportieren* bzw. *Fördern* beschreibt eine zielgerichtete räumliche Transformation von Gütern zwischen Quellen und Senken. Es wird zwischen innerbetrieblichen oder außerbetrieblichen Transportprozessen unterschieden [Pfo-2010, S. 119; Jün-1989, S. 16]. Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen Prozesse des innerbetrieblichen Materialflusses. Daher wird der Begriff *Transportieren* im Rahmen dieser Arbeit synonym mit dem Begriff *Fördern* verwendet und auf innerbetriebliche Transporte beschränkt.
- **Handhaben**
Diese Funktionsgruppe umfasst nichtfördernde Funktionen wie Prüfen, Bewegen (Änderung der Orientierung, Anheben zum Wechsel des Transporthilfsmittels), Be- und Entladen, Sichern oder Palettieren [Gün-2010b] und lässt sich dem Umschlagsprozess zuordnen [Pfo-2010].
- **Lagern**
Diese Funktion ermöglicht eine langfristige Zeitüberbrückung im Materialfluss und entspricht einem gewollten Liegen der Güter. Das Lagern dient dem Ausgleich von Liefer- und Verbrauchs- bzw. Nachfrageschwankungen, der Sicherung der Lieferfähigkeit, Reifungsprozessen oder der Spekulation auf Wertsteigerung [Gün-2010b].
- **Verteilen/Zusammenführen**
Bei der Funktion *Verteilen* können Güter von einer Quelle (Eingang) mehrere parallele Senken (Ausgänge) erreichen. Beim *Zusammenführen* verhält es sich umgekehrt. Synonym finden sich in der Literatur die Begriffe *Verzweigen* und

Sammeln. Umgesetzt werden diese Funktionen oftmals in Form von Sortiersystemen, welche Stückgüter aufgrund vorgegebener Unterscheidungsmerkmale unter Berücksichtigung einer Zielsteuerung in einen kontinuierlichen Transportprozess ein- oder aus diesem ausschleusen [Gün-2010b].

- Sequenzieren

Das *Sequenzieren* dient der Herstellung einer vorgegebenen Reihenfolge, in der die Güter einen Prozessschritt (z.B. Kommissionierung, Versand) erreichen müssen. Diese Funktion kann mit der Funktion *Puffern* verknüpft sein, wenn einzelne Güter kurzfristig auf andere Güter warten müssen, da diese den nächsten Zielpunkt gemäß einer vorgegebenen Sequenz vor ihnen erreichen sollen.

- Puffern

Diese Funktion dient einer gewollten kurzfristigen Zeitüberbrückung ohne räumliche Transformation, um auf das Eintreten der Eingangsbedingung (z.B. freie Förderstrecke) eines nachfolgenden Prozessschritts zu warten.

- Kommissionieren

Das *Kommissionieren* entspricht dem Zusammenstellen von Teilmengen aufgrund von Aufträgen aus einer Gesamtmenge (Sortiment) [VDI 3590-1].

- Prüfen

Diese Funktion umfasst sämtliche Kontrollvorgänge (z.B. Messen, Zählen, Wiegen, Identifizieren) im Materialfluss [Jün-1989, S. 16] und ist eine Unterfunktion des Handhabens. Diese Funktion ist häufig Voraussetzung für andere Funktionen (z.B. Verteilen/Zusammenführen, Sequenzieren), für welche Eigenschaften oder die Identität der Güter im Materialfluss von Bedeutung sind.

- Aus-/Einlagern

Diese spezielle Funktion stellt eine Kombination aus Handhaben und Fördern dar und ermöglicht einen direkten Zugriff auf einzelne Lagerplätze. Diese Funktion kann manuell, mit Flurförderzeugen oder mit speziellen Bediengeräten (z.B. Regalbediengerät, Shuttle) umgesetzt werden.

- Verpacken

Das *Verpacken* dient einer lösbaren, vollständigen oder teilweisen Umhüllung eines Gutes [Pfo-2010]. Für intralogistische Prozesse kann die Verpackung

von Gütern eine Schutz- und/oder Informationsfunktion (z.B. durch Aufschriften oder Barcodes) erfüllen und eine Transport-, Manipulations- oder Lagerfähigkeit (z.B. Stapelfähigkeit) herstellen [Pfo-2010].

Die aufgeführten logistischen Funktionen sind den oben genannten Kernprozessen des Güterflusses Transport, Umschlag und Lagerung zuzuordnen (Ausnahme: *Verpacken*) und bilden somit die Anwendungsdomäne Intralogistik hinreichend ab. Die an dieser Stelle nicht berücksichtigten Signierungsprozesse und Prozesse des Informationsflusses (Auftragsübermittlungs-, Auftragsbearbeitungsprozesse) gehen an anderer Stelle in die Ermittlung des Informationsbedarfs selbststeuernder Fahrzeugkollektive ein (Abschnitt 4.3).

2.1.2 Förder- und Materialflusstechnik

Gemäß Günthner [Gün-2012] bezeichnet der Begriff *Fördertechnik* „die Technik des Fortbewegens von Gütern und Personen in beliebiger Richtung über bestimmte Entfernungen“. Das Fortbewegen kann stetig (kontinuierlich) oder unstetig (intermittierend) erfolgen. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal für fördertechnische Geräte (*Fördermittel*) ist die Beschaffenheit des zu transportierenden Guts (Stückgut oder Schüttgut). Die autonomen mobilen Transportroboter eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs, welche den Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit darstellen, sind als flurgebundene, gleislose Unstetigförderer für den Stückguttransport einzuordnen (vgl. Tabelle 2-1). Die Fördermittel dieser Gruppe werden auch als *Flurförderzeuge*⁸ bezeichnet. Ausführungsbeispiele für Flurförderzeuge sind Hubwagen, Gabelstapler, Schlepper und Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF). Die Arbeitsfelder der Fördertechnik umfassen die Gestaltung und den Einsatz fördertechnischer Systemelemente. Zu diesen zählen neben Flurförderern Hebezeuge (z.B. Protalkran), Stetigförderer (z.B. Rollenförderer), Lagertechnik (z.B. Regalbediengerät, RBG) und Sondergebiete wie Seilbahnen. Zusammenfasst steht der Begriff *Fördertechnik* für die Geräteebene in intralogistischen Systemen.

⁸ Der Begriff *Flurförderzeug* bezeichnet „gleislose, überwiegend innerbetrieblich verwendete Fahrzeuge mit oder ohne Einrichtungen zum Heben oder Stapeln von Lasten“ [Jün-1989, S. 228].

Tabelle 2-1: Systematik der Fördermittel für den Stückguttransport

Stetigförderer			Unstetigförderer			
flurgebunden	aufgeständert	flurfrei	flurgebunden		flurfrei	
			gleisgebunden	gleislos	spurgebunden	freiverfahrbar
Schubskid-Anlage	Rollenbahn	Kreisförderer	RBG	Hubwagen	EHB ⁹	Krane
Schleppkette	Kugelbahn	Power&Free-Förderer	QVW	Gabelstapler		
	Bandförderer			Schlepper		
	Kettenförderer			Handwagen		
				FTF (FTS)		
			Mobiler Transportroboter (Selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv)			

Der Begriff *Materialflusstechnik* beschreibt die Aggregationsebene fördertechnischer Anlagen. Auf dieser Ebene werden neben den Geräten der Fördertechnik auch Informationsflussmittel (Techniken zum Erfassen, Übertragen, Verarbeiten und Ausgeben von Daten, Datenträger) und die übergeordnete Steuerungstechnik betrachtet, die für den Betrieb einzelner Anlagenteile erforderlich sind. Zu den Systemelementen der Materialflusstechnik zählen somit neben der Förder- und Lagertechnik Elemente der Kommissioniertechnik, der Handhabungstechnik, der Montagetechnik, der Umschlagstechnik, der Verpackungstechnik sowie der Informations- und Steuerungstechnik. Die Steuerung und der Informationsaustausch innerhalb eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs, welches als Fördertechnikelemente autonome mobile Transportroboter umfasst, ist dieser Ebene zuzuordnen. Die Arbeitsfelder der Materialflusstechnik umfassen die Organisation, die Planung und den wirtschaftlichen Betrieb fördertechnischer Anlagen.

Die Verknüpfung und exakte Steuerung des Material- und Informationsflusses über mehrere fördertechnische Anlagen – aber auch über mehrere Standorte einer Wertschöpfungskette hinweg – ist Aufgabe der *Logistik*. Die Logistik repräsentiert somit die Systemebene. Diese Ebene wird in der vorliegenden Arbeit lediglich als abstrakte, übergeordnete Ebene betrachtet, auf der logistische Globalziele vorgegeben

⁹ Schienenhängebahnen (bzw. *Elektrohängebahnen*, EHB) sind laut *DIN 15201, Teil 1* [DIN 15201-1] in Materialflusssystemen oftmals mit Stetigförderern verkettet und werden daher mitunter selbst wie Stetigförderer eingesetzt. Streng genommen sind EHBs jedoch als Unstetigförderer einzustufen.

werden, welche es auf Ebene der Förder- und Materialflusstechnik durch abgeleitete Teilziele zu unterstützen gilt.

Als Ausführungsbeispiel sowohl für die fördertechnische als auch für die materialflusstechnische Ebene wird im folgenden Abschnitt der Aufbau Fahrerloser Transportsysteme (FTS) beschrieben. Diese weisen aufgrund der strukturellen und funktionalen Ähnlichkeit zu selbststeuernden Fahrzeugkollektiven eine besondere Relevanz für die vorliegende Arbeit auf.

Fahrerlose Transportsysteme

Fahrerlose Transportsysteme (FTS)¹⁰ sind „*innerbetriebliche, flurgebundene Fördersysteme mit automatisch gesteuerten Fahrzeugen, deren primäre Aufgabe der Materialtransport [...] ist*“ [VDI 2510] und weisen i.d.R. folgende Systemelemente auf:

- mehrere Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF¹¹)
- Leitsteuerung
- Kommunikationseinrichtung
- Navigationssystem
- Warn- und Sicherheitseinrichtungen
- Infrastruktur und periphere Einrichtungen (z.B. Tore, Übergabepunkte)

Einfache Punkt-zu-Punkt-Transporte gehören ebenso zum Einsatzspektrum Fahrerloser Transportsysteme wie komplexe, rechnergesteuerte Transport- und Montagestrecken mit mehreren Übergabepätzen und Ausweichrouten. In letzterem Fall dienen die fahrerlosen Fahrzeuge typischerweise der Verknüpfung von Bearbeitungsmaschinen und Arbeitsplätzen oder als „Mobile Werkbank“. Der Aufbau der Fahrerlosen Transportfahrzeuge orientiert sich am jeweiligen Anwendungsfall und den zu transportierenden Gütern bzw. Transporthilfsmitteln und ist daher sehr varianten-

¹⁰ Einen umfangreichen Überblick über den aktuellen Stand der Technik auf dem Gebiet Fahrerloser Transportsysteme (FTS) und über deren Einsatzmöglichkeiten bietet [Ull-2011].

¹¹ engl.: *Automated Guided Vehicle*, AGV

reich (vgl. Abbildung 2-1). Beispielhaft seien an dieser Stelle einige Bauformen und Anwendungsfelder aufgezählt:

- Schlepper-FTF: ziehender Transport antriebsloser Wagen
- Hubgabel-FTF: Heben und Transportieren von Lasten (z.B. Palette, Gitterbox)
- FTF mit integrierten Rollenbahnen: Transport von Paletten oder KLTs
- Unterfahrschlepper: Transport von Rollcontainern
- FTF-Tambourtransporter: Transport von Papier- oder Kartonrollen

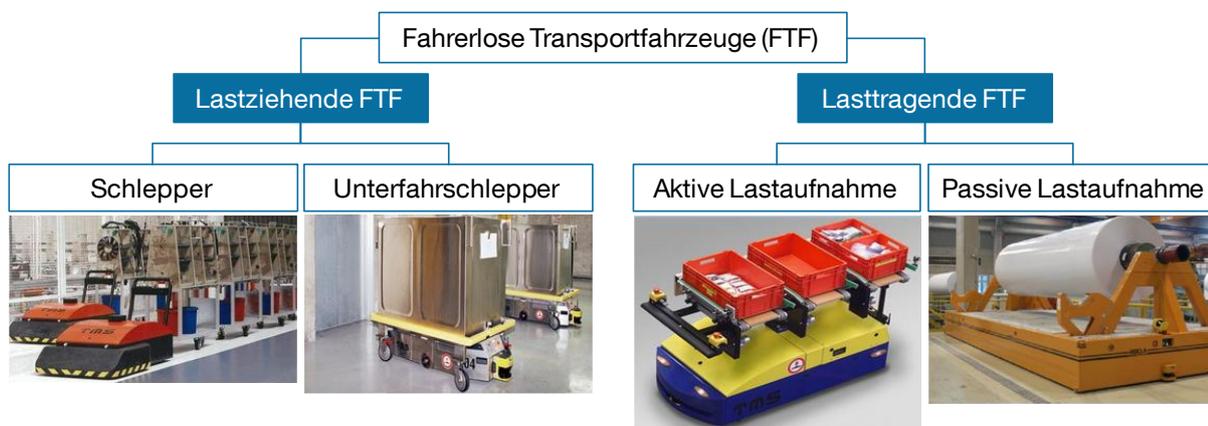


Abbildung 2-1: Bauformen Fahrerloser Transportfahrzeuge (Bildquellen: DS Automation, rocla)

Für innerbetriebliche Transporte im Outdoor-Bereich werden speziell entwickelte FTF mit entsprechenden Antriebs- und Führungstechniken eingesetzt [Ull-2006]. In großen Krankenhauskomplexen unterstützen Fahrerlose Transportsysteme die Versorgung der Stationen mit Essen, Medikamenten, Wäsche und Post und entsorgen gleichzeitig Müll, Geschirr und Schmutzwäsche [Hep-2007]. Zum Einsatz kommen automatisierte Unterfahrschlepper, welche Rollcontainer aufnehmen und bewegen können und Aufzüge zum Ebenenwechsel nutzen.

Die VDI-Richtlinie 2510 „Fahrerlose Transportsysteme (FTS)“ [VDI 2510] nimmt eine Einordnung mobiler flurgebundener Systeme in vier Kategorien vor (vgl. Tabelle 2-2). Anhand dieser Einteilung lässt sich der Unterschied zwischen Fahrerlosen Transportsystemen und einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv verdeutlichen. Zwar werden in beiden Systemen die Transportfahrzeuge automatisch gesteuert. Jedoch bewegen sich Fahrerlose Transportfahrzeuge auf vom Menschen vorgegebenen Fahrwegen, während ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv aus autonomen Robo-

tern besteht, denen zwar Zielkoordinaten, nicht aber die genauen Fahrwege vorgegeben sind.

Tabelle 2-2: Systematik der mobilen flurgebundenen Systeme [VDI 2510]

Vom Menschen gesteuert	Automatisch gesteuert
Vom Menschen direkt gesteuert (klassischer Gabelstapler, LKW, ...)	Fahrweg vom Menschen vorgegeben (Fahrerlose Transportfahrzeuge)
Vom Menschen ferngesteuert (Manipulatorfahrzeuge)	Fahrweg nicht vorgegeben (autonome Roboter)

Aufgrund der bestehenden Ähnlichkeiten zwischen beiden Systemen hinsichtlich Struktur (Verbund aus automatisierten Fahrzeugen) und logistischer Aufgabe (i.d.R. innerbetrieblicher Warentransport) können jedoch die in Fahrerlosen Transportsystemen verwendeten Kommunikationseinrichtungen als Grundlage für die Entwicklung eines Kommunikationskonzepts selbstorganisierter Fahrzeugkollektive, wie es in dieser Arbeit angestrebt wird, dienen. Eine Untersuchung der Kommunikation in Fahrerlosen Transportsystemen findet daher im Rahmen des dritten Kapitels (Abschnitt 3.2) statt, welches sich mit Grundlagen und relevanten Anwendungsfeldern der Kommunikationstechnik befasst.

Selbststeuernde Transportfahrzeuge werden in der vorliegenden Arbeit synonym als *mobile Transportroboter* bzw. *autonome Flurförderzeuge* bezeichnet. Die Fahrzeuge sind ausschließlich für innerbetriebliche Transporte konzipiert. Ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv setzt sich folglich aus einer Vielzahl an mobilen Transportrobotern bzw. autonomen Flurförderzeugen zusammen.

2.1.3 Materialflussteuerung

Zur Steigerung der Effizienz und zur Kostenreduktion intralogistischer Prozesse ist eine automatisierte Steuerung von Materialflussanlagen von entscheidender Bedeutung. Die Elemente der Materialflussautomatisierung lassen sich in einem hierarchischen Ebenenmodell abbilden (vgl. Abbildung 2-2).

Zur *Feldebene* zählen alle im Materialflusssystem befindlichen Sensoren und Aktoren. Die *Steuerungsebene* verarbeitet die Signale der Feldebene¹². Sie steuert und koordiniert beispielsweise Transporte oder Lastübergaben und gewährleistet alle sicherheitsrelevanten Funktionen. In der *Prozesselebene* sendet der *Materialflussrechner* (MFR) definierte Vorgaben an die Steuerungstechnik. In dieser Schicht ist i.d.R. auch die Visualisierung angeordnet. Auf dieser Ebene kann über Barcode- und RFID-Lesegeräte oder mobile Datenterminals (MDT) auf Prozessdaten zugegriffen werden. Die *Betriebslebene* übernimmt alle lagerverwaltungstechnischen Aufgabe wie die Verwaltung von Aufträgen, die Disposition von Beständen etc. Das Warenwirtschaftssystem (WWS, engl. *Enterprise Resource Planning*, ERP) bildet höherwertige Geschäftsprozesse der *Unternehmenselebene* ab.

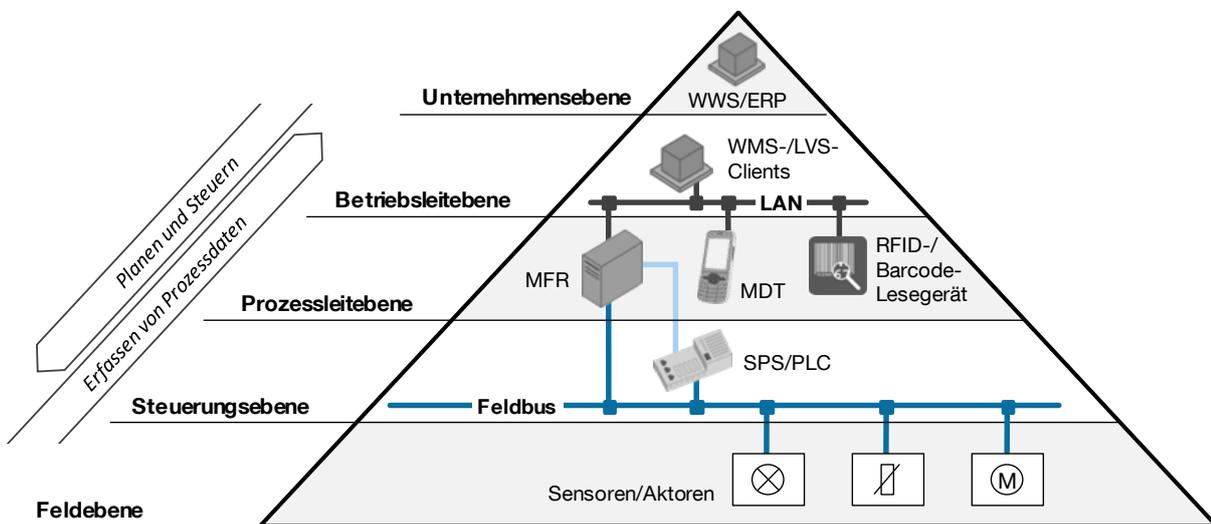


Abbildung 2-2: Ebenenmodell der Materialflussautomatisierung in der Logistik

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff *Materialflusssteuerung* gemäß folgender Definition verwendet [Lie-2009, S. 14]:

„Die *Materialflusssteuerung* erfasst und verwaltet Transportanforderungen angrenzender Informationssysteme in Form von Aufträgen. Sie initiiert eine zeitnahe Übergabe von Gütern in das Materialflusssystem und erfasst die Positionen der Güter fortlaufend. Unter Berücksichtigung der Zielangaben von Gütern werden Förderelemente situationsgerecht so angesteuert, dass der Materialfluss ohne Überschreitung der Systemkapazität auftragsgemäß erfolgen kann.“

¹² Die Signalverarbeitung erfolgt meist in Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS, engl. *Programmable Logic Controller*, PLC).

Hinsichtlich der Steuerung von Materialflusssystemen lassen sich drei grundlegende Modellierungsansätze unterscheiden (Abbildung 2-3).

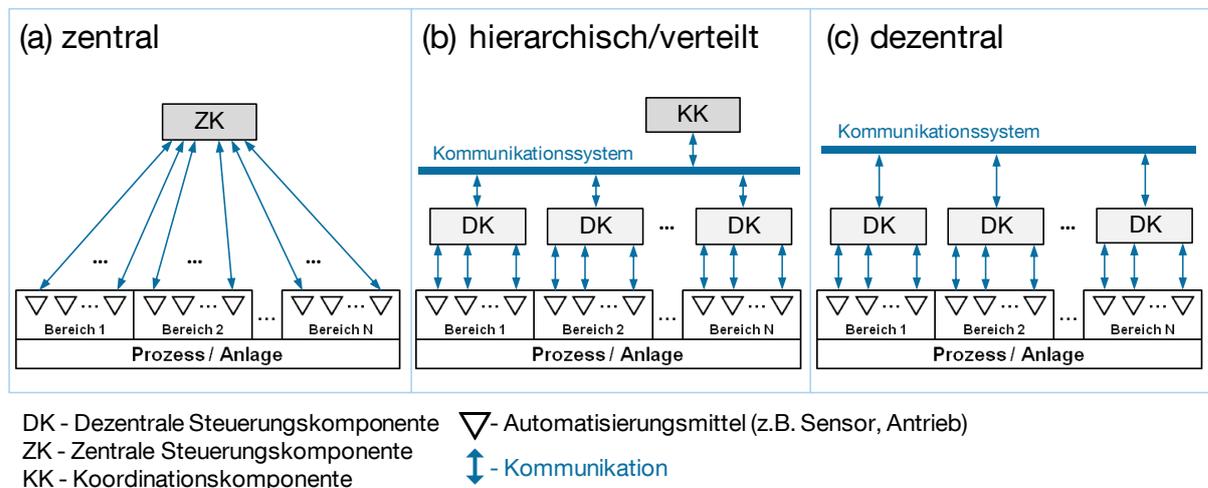


Abbildung 2-3: Zentrale (a), hierarchische/verteilte (b) und dezentrale (c) Steuerungsorganisation (in Anlehnung an [Jün-1998, S. 142])

Komplett zentral gestaltete Steuerungsstrukturen nutzen einen einzigen Steuerrechner, der sämtliche Geräte der Feldebene ansteuert. In heutigen Materialflusssystemen findet diese Form der Steuerungsorganisation aufgrund der mit ihr verbundenen Konzentration komplexer Funktionen in einer zentralen Komponente kaum mehr Verwendung. Das hohe Risiko für das Materialflusssystem bei einem Ausfall der zentralen Steuerungskomponente sowie die Starrheit des zentralen Steuerungsprogramms gegenüber Änderungen haben dazu geführt, dass diese Steuerungsform vermehrt durch eine hierarchisch verteilte Steuerungsorganisation abgelöst wurde.

Hierarchisch aufgebaute Steuerungssysteme verfügen sowohl über zentrale als auch über dezentrale Steuerungskomponenten. Die dezentralen Komponenten (z.B. SPS) werden durch übergeordnete Einheiten (z.B. Materialflussrechner) koordiniert. Aufgrund einer stark erhöhten Flexibilität im Vergleich zu zentral gesteuerten Systemen weisen hierarchische Steuerungsorganisationen (mit unterschiedlich hohem Dezentralisierungsgrad) die weiteste Verbreitung auf [Jün-1998, S. 142]. Auch das Ebenenmodell in Abbildung 2-2 entspricht dieser Steuerungsorganisation.

Eine komplett dezentrale Steuerungsorganisation verspricht Vorteile hinsichtlich Flexibilität, Skalierbarkeit und Robustheit [Kuz-2010; Chi-2010; Nop-2011]. Eine dezentrale Steuerung ist jedoch mit neuen Herausforderungen verbunden, da sich die dezentralen Steuerungskomponenten in verschiedenen Kontexten (z.B. in unter-

schiedlichen Topologien, bei schwankendem Auftragsaufkommen, bei Nichtverfügbarkeit von Teilsystemen) ohne zentrale Koordination effizient verhalten müssen [Hei-2011a]. Zudem erhöhen sich Komplexität und Umfang der Kommunikation durch die Verteilung der Steuerungslogik auf viele Komponenten [Chi-2010, S. 62].

Bevor im nächsten Abschnitt auf dezentrale Steuerungskonzepte zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit von Materialflusssystemen eingegangen wird, erfolgt an dieser Stelle die Vorstellung zweier konventioneller Steuerungsmodelle, um den Stand der Technik im Bereich der Materialflussteuerung abzurunden. Es handelt sich um die hierarchische Steuerungsarchitektur nach dem VDMA-Einheitsblatt 15276 „*Datenschnittstellen in Materialflusssystemen*“ [VDMA 15276] sowie um den VDI/VDMA-Richtlinienentwurf 5100 „*Softwarearchitektur für die Intralogistik (SAIL)*“ [VDI/VDMA 5100]. Die hierarchische Steuerungsarchitektur nach VDMA 15276 sieht eine Gliederung der Materialflussteuerung in sechs Ebenen mit festgelegten Funktionalitäten und Schnittstellen vor:

- Ebene 1: Antriebe und Sensoren
- Ebene 2: Elementsteuerung
- Ebene 3: Bereichssteuerung
- Ebene 4: Subsystemsteuerung
- Ebene 5: Systemsteuerung
- Ebene 6: Darstellung und Kommunikation

Eine Festlegung, auf welcher Hardware die Steuerungsfunktionen der einzelnen Ebenen umzusetzen sind, erfolgt nicht. Zudem können Funktionen mehrerer Ebenen kombiniert und auf derselben Hardware implementiert werden. Im Gegensatz zum hierarchisch aufgebauten Ebenenmodell nach VDMA 15276 basiert der VDI/VDMA-Richtlinienentwurf 5100 auf einem funktionsorientierten Ansatz zur Gestaltung intralogistischer Steuerungssysteme sowie auf Komponenten mit einheitlichen Schnittstellen [Irr-2007]. Die Materialflussteuerung nutzt in diesem Konzept die folgenden Standardfunktionen:

- Anlagensteuerung (*Facility Control*, F:FC)
- Informationsgewinnung (*Information Collection*, F:IC)

- Fahrauftragsverwaltung (*Mission Management*, F:MM)
- Richtungssteuerung (*Direction Control*, F:DC)
- Ressourcennutzung (*Resource Utilisation*, F:RU)

Das SAIL-Modell orientiert sich an Konzepten der objektorientierten Programmierung (OOP) und verbessert auf diese Weise die Transparenz und die Austauschbarkeit von Komponenten und Programmbausteinen. Dennoch weist auch das SAIL-Modell einen hierarchischen Charakter auf und ersetzt somit die technisch bedingte Hierarchie herkömmlicher Materialflusssysteme lediglich durch eine funktionsbedingte Hierarchie [Chi-2010; Lib-2011].

Nachdem in diesem Abschnitt die grundlegenden Prozesse und Technologien konventioneller Materialflusssysteme vorgestellt wurden, widmet sich der folgende Abschnitt neuartigen Konzepten zur Gestaltung und Steuerung derartiger Systeme. Vor dem Hintergrund sich verändernder Anforderungen an Materialflusssysteme (z.B. gesteigerte Dynamik und Komplexität der abzubildenden Prozesse) haben diese Konzepte zum Ziel, die Förder- und Materialflusstechnik sowie deren Steuerung so robust, flexibel und wandelbar als möglich zu gestalten.

2.2 Gestaltungsgrundlagen wandelbarer Materialflusssysteme

Die in Abschnitt 1.1 dieser Arbeit dargelegte Ausgangssituation stützt die These, dass in Branchen, die auf ein immer schwerer prognostizierbares Kundenverhalten reagieren müssen, eine langfristige Vorausplanung und Auslegung von Materialflusssystemen angesichts schwankender Auftragseingänge und umfangreicher, sich schnell verändernder Sortimente nicht mehr zielführend und wirtschaftlich sinnvoll ist. Vor diesem Hintergrund suchen Industrie und Forschung verstärkt nach Möglichkeiten, fördertechnische Anlagen derart zu gestalten, dass diese sich jederzeit einfach, kurzfristig und kostengünstig an sich ändernde Rahmenbedingungen anpassen lassen (z.B. durch Erweiterungen oder Rückbauten).

Die aufwandsarme und kostengünstige Anpassbarkeit eines technischen Systems an sich stark verändernde Prozessbedingungen ist eng mit dem Begriff der *Wandelbarkeit* verknüpft, dessen Bedeutung der folgende Abschnitt eingrenzt (Abschnitt 2.2.1). Des Weiteren werden sowohl mechanische (Abschnitt 2.2.2) als auch steuerungstechnische (Abschnitt 2.2.3) Gestaltungskonzepte vorgestellt, deren Anwen-

die Flexibilität und Wandelbarkeit in Materialflusssystemen erhöht. Die zu erwartende logistische Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit wandelbarer, dezentral gesteuerter Materialflusssysteme wird in Abschnitt 2.2.4 diskutiert. Abschließend geben ausgewählte praktische Umsetzungen wandelbarer Materialflusssysteme in Form von Versuchsanlagen und industriellen Lösungen einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung und Technik auf diesem Gebiet (Abschnitt 2.2.5).

2.2.1 Der Begriff der Wandelbarkeit

Wandelbarkeit¹³ entspricht der Erweiterbarkeit und Veränderbarkeit eines Systems über vorab geplante Grenzen hinaus und kann somit als Kombination aus Flexibilität und Reaktionsfähigkeit betrachtet werden [Kuz-2010, S. 5]. Aufbauend auf früheren Arbeiten zum Thema der Wandelbarkeit in Materialflusssystemen [Han-2002; Wil-2006; Hei-2006] definiert Chisu [Chi-2010] vier Flexibilitätsarten und zwei Leit motive als grundlegende Voraussetzungen für wandelbare Systeme:

- Layoutflexibilität
- Fördergutflexibilität
- Durchsatzflexibilität
- Prozessflexibilität
- Erweiterbarkeit
- Integrationsfähigkeit

Unter Flexibilität wird im Gegensatz zur Wandelbarkeit eine permanent vorgehaltene strukturelle und prozessuale Anpassungsfähigkeit eines Materialflusssystems verstanden. Der Grad der Flexibilität wird von vorab festgelegten Grenzen determiniert (operative Flexibilität). Nur durch die Erweiterbarkeit (Hinzufügen systemeigener Komponenten und Fahrzeuge) und die Integrationsfähigkeit (Kombinierbarkeit verschiedener Materialflusssysteme) können diese Grenzen als Reaktion auf nicht geplante Veränderungen überschritten werden (strategische Wandelbarkeit). Abbildung 2-4 verdeutlicht diese Zusammenhänge. Die von Chisu [Chi-2010] ergänzte Prozess-

¹³ auch *Wandlungsfähigkeit* (dieser Begriff wird jedoch selten für technische Systeme sondern eher für Organisationsstrukturen verwendet [Wil-2006, S. 20])

flexibilität lässt sich durch Erweiterbarkeit und Integrationsfähigkeit nicht erhöhen, da sie selbst als Voraussetzung für diese beiden Eigenschaften gesehen werden kann. Demnach bezeichnet die Prozessflexibilität „die Möglichkeit, die in einer Anlage ablaufenden logistischen Prozesse mit minimalem Aufwand zu verändern, ohne dabei einen zentralen Steuerungscomputer oder zahlreiche autonome Einheiten umprogrammieren oder umkonfigurieren zu müssen. Das System muss [...] sozusagen in der Lage sein, auf Knopfdruck eine neue oder veränderte logistische Aufgabe umzusetzen.“ [Chi-2010, S. 39]

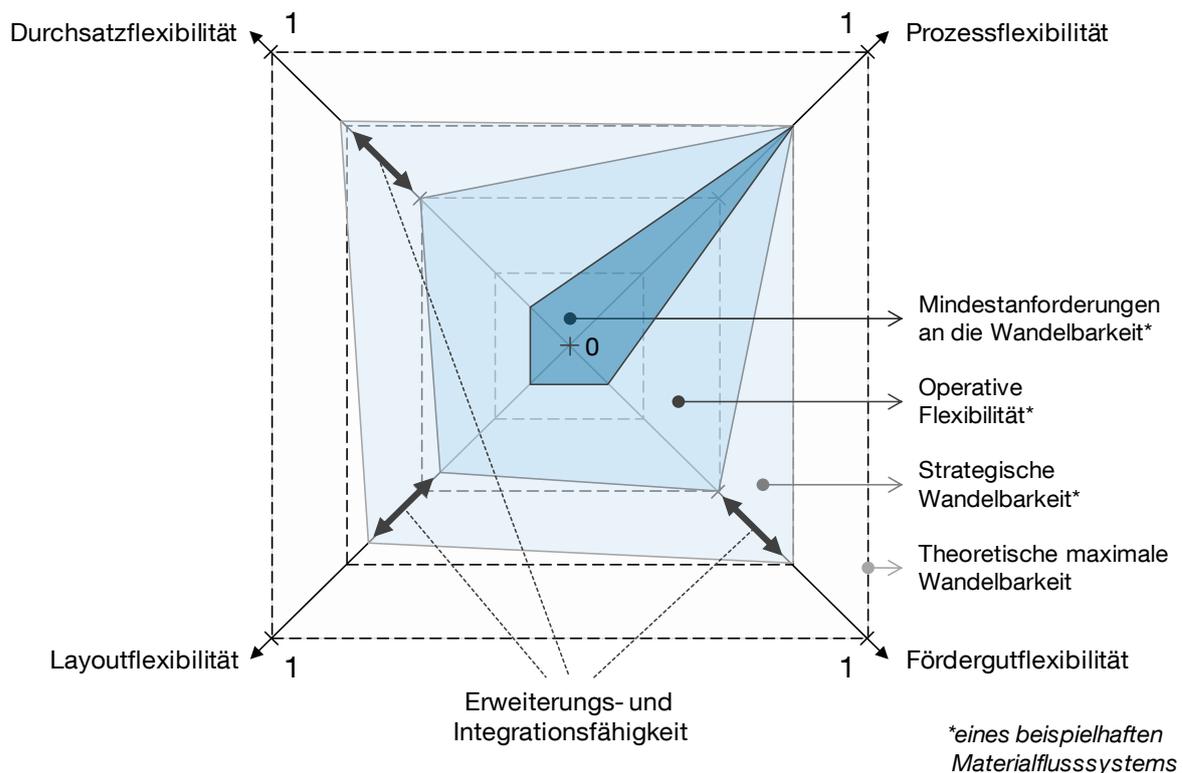


Abbildung 2-4: Dimensionen der Wandelbarkeit (in Anlehnung an [Wil-2006] und [Chi-2010])

Abgeleitet von den oben genannten Vorarbeiten sollen im Rahmen dieser Arbeit die folgenden, auf den Untersuchungsbereich *Intralogistik* abgestimmten Definitionen der Begriffe *Flexibilität* und *Wandelbarkeit* nach Nopper gelten [Nop-2011, S. 31]:

„Unter Flexibilität in der Intralogistik wird die Fähigkeit eines Materialflusssystems verstanden, sich innerhalb der beim Aufbau des Systems gesetzten Grenzen an die Anforderungen der Umgebung anzupassen. Unter Wandelbarkeit in der Intralogistik wird die Fähigkeit eines Materialflusssystems verstanden, sich über die beim Aufbau des Systems gesetzten Grenzen hinaus an die Anforderungen der Umgebung anzupassen. Dafür muss das System in geeigneter Weise erweiterbar oder veränderbar

sein. Die Anforderungen der Umgebung lassen sich für Materialflusssysteme vollständig entlang der Dimensionen Fördergut, Layout und Durchsatz beschreiben.“

Als Stellhebel zur Steigerung der Wandelbarkeit intralogistischer Systeme werden in den folgenden Abschnitten die Konzepte *Funktionsorientierte Modularisierung* (Abschnitt 2.2.2) und *Dezentrale Materialflusssteuerung* (Abschnitt 2.2.3) vorgestellt, welche auch der Gestaltung selbststeuernder Fahrzeugkollektive zugrunde liegen.

2.2.2 Funktionsorientierte Modularisierung

Wandelbare Materialflusssysteme erfordern den Einsatz eigenständiger Fördertechnikmodule, welche mechanisch, energetisch und steuerungstechnisch autonom sind und deren Automatisierung dem Konzept der verteilten Automatisierung folgt [Wil-2006]. Die Modulgrenzen werden funktionsorientiert gezogen. Kriterien der funktionsorientierten Modularisierung sind [Wil-2006, S. 31]:

- *Zerlegbarkeit* des Systems in Subsysteme/Submodule
- uneingeschränkte *Kombinierbarkeit* der Module zu neuen Systemen und Subsystemen
- *Verständlichkeit* der Modulfunktion für den Anwender ohne Kenntnisse über den inneren Aufbau des Moduls (Black-Box-Prinzip)
- *Stetigkeit und Geschützttheit (Kapselung)* der Funktion des Gesamtsystems bei Fehlern und Störungen innerhalb eines einzelnen Moduls
- *identische Systemgrenzen* für Mechanik, Energie und Steuerungstechnik eines Moduls
- *funktionsorientierte Betrachtungsweise* beim Ziehen der Modulgrenzen (Erfüllung der Funktion ohne Einbettung in Gesamtsystem möglich)

Die Kriterien der funktionsorientierten Modularisierung sollen im Rahmen dieser Arbeit für die autonomen Flurförderzeuge eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs als erfüllt gelten. Kuzmany überträgt die Prinzipien der funktionsorientierten Modularisierung auf dezentral gesteuerte Materialflusssysteme nach dem Internet-der-Dinge-Prinzip [Kuz-2010]. Auf dieses Prinzip zur dezentralen Steuerung wandelbarer Materialflusssysteme wird im Folgenden näher eingegangen.

2.2.3 Dezentrale Materialflussteuerung

Konventionelle Steuerungsarchitekturen für Materialflusssysteme sind meist hierarchisch aufgebaut (vgl. Abschnitt 2.1.3). Jede hierarchische Steuerungsebene enthält zentrale Koordinationskomponenten für die untergeordneten Komponenten (vgl. Abbildung 2-3). Für Prozesse, die häufigen Änderungen unterworfen sind, ist dieser Steuerungsansatz mit vielen Nachteilen verknüpft, die von einer schlechten Wiederverwendbarkeit der Steuerungsprogramme bis hin zu einem kritischen Anstieg der Komplexität in zentralen Komponenten (z.B. Materialflussrechner) reichen (vgl. [Nie-2010, S. 19-21] und [Lib-2011, S. 14-16]).

Als Reaktion auf diese Schwachstellen hat sich in den vergangenen Jahren ein neuer Schwerpunkt der angewandten Forschung im Bereich automatisierter Materialflusssysteme etabliert, der sich der Untersuchung und Entwicklung dezentraler Steuerungskonzepte widmet [Hül-2007; Fur-2009; Ove-2010]. Dezentral gesteuerte Materialflusssysteme versprechen eine verbesserte Flexibilität und Wandelbarkeit sowie eine erhöhte Robustheit gegenüber Störungen und Komponentenausfällen [Nop-2011, S. 15]. Wirtschaftliche Vorteile entstehen durch eine verkürzte Inbetriebnahmezeit und eine aufwandsarme Erweiterbarkeit und Wiederverwendbarkeit der Materialflussteuerung (vgl. Abschnitt 2.2.4).

Bei der dezentralen Steuerung werden die Steuerungsfunktionen auf einzelne Komponenten mit geringerem Funktionsumfang verteilt. Die Komponenten (Steuerungen, Sensoren, Aktoren) sind über ein Kommunikationssystem miteinander verbunden (vgl. Abbildung 2-3). Die Steuerungsprogramme der einzelnen Komponenten weisen eine vergleichsweise geringe Komplexität auf und der Ausfall einer Steuerung bedingt lediglich den Ausfall eines Teilsystems. Selbststeuernde Komponenten verschiedener Hersteller lassen sich einfach und ohne Änderungsaufwand an zentralen Komponenten kombinieren, sofern diese zusätzlich über einheitliche mechanische und energetische Schnittstellen verfügen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die Nachteile einer dezentralen Steuerungsarchitektur liegen in einem erhöhten Kommunikationsaufwand innerhalb der Systemgrenzen und einer erschwerten Gewährleistung der Datenkonsistenz im System, da sämtliche Daten im System verteilt sind [Chi-2010]. Beide Schwachstellen werden von dem im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Kommunikationskonzept adressiert.

Im Folgenden wird ein konkreter dezentraler Steuerungsansatz für Materialflusssysteme mit der Bezeichnung *Internet der Dinge in der Intralogistik* vorgestellt. Dieser

Steuerungsansatz bildet auch die Ausgangsbasis der vorliegenden Arbeit und hat sowohl Einfluss auf Gestaltung und Steuerung der autonomen Flurförderzeuge als auch auf das Kommunikationsverhalten innerhalb eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs.

Das Internet der Dinge in der Intralogistik

Der Begriff *Internet der Dinge* (engl. *Internet of Things*) wurde am AutoID Lab des Massachusetts Institute of Technology (MIT) geprägt [Fle-2005; Mat-2009] und bezeichnet in seiner ursprünglichen Bedeutung ein Kommunikationsnetzwerk zwischen Geräten (*Dingen*) analog zum Rechnernetzwerk des Internets. Bekanntes Anwendungsbeispiel für das Internet der Dinge ist ein Kühlschrank, der die in ihm enthaltenen Lebensmittel überwacht (Menge, Verfallsdatum) und bei Bedarf (Produkt aufgebraucht/abgelaufen) Lebensmittel automatisch nachbestellt.

Bezogen auf die Anwendungsdomäne Intralogistik lässt sich die Internet-der-Dinge-Metapher noch auf andere Weise interpretieren [Hom-2006a; Gün-2010b]. Bei dieser Interpretation übernimmt das zu transportierende Gut (analog zu Datenpaketen im Internet) selbst die steuernde Rolle und nutzt die Transportdienste einer Förderanlage (analog zu Datenleitungen und Routern im Internet), um an seinen Zielpunkt zu gelangen [Hom-2006b; Chi-2010, S. 22f]. Diese Art der Steuerungsorganisation ermöglicht eine automatische, dezentrale Um- bzw. Neuplanung von Transportrouten bei Störungen oder Blockaden [Sch-2007a] und weist somit eine erhöhte Robustheit gegenüber konventionell gesteuerten Systemen auf.

Die Umsetzung der Vision eines *Internet der Dinge in der Intralogistik* basiert auf einer konsequenten *funktionsorientierten Modularisierung* der Fördertechnik (vgl. Abschnitt 2.2.2), dem Einsatz von *Softwareagenten* zur Dezentralisierung der Steuerungszintelligenz und der Ausstattung der logistischen Objekte mit *RFID-Transpondern* zur prozessnahen Zielverwaltung [Gün-2010b; Nop-2010, S. 8-9; Lib-2011, S. 22f]. Ein Internet der Dinge in der Intralogistik setzt sich aus folgenden Grundeinheiten (Entitäten¹⁴) zusammen [Gün-2008c]:

¹⁴ „Materialflusstechnische Entitäten sind autonom agierende Dienstbringer im steuerungstechnischen und/oder im förderstechnischen Sinne.“ [Hom-2011, S. 86]

- Transporteinheiten (TE), welche steuerungsrelevante Informationen auf RFID-Transpondern mit sich führen.
- Module, welche ihre logistische Funktion anbieten und deren Modulgrenzen den Kriterien einer funktionsorientierten Modularisierung entsprechen.
- Dienste, welche die Koordination zwischen Transporteinheiten und Modulen unterstützen (z.B. Verzeichnisdienste) oder die Systemtransparenz steigern (z.B. Visualisierung) und als Softwareprogramme implementiert sind.

Abbildung 2-5 stellt den hierarchischen Aufbau einer konventionellen Materialflusssteuerung der flachen Steuerungsarchitektur eines Internet der Dinge in der Intralogistik gegenüber. Sämtliche Funktionen, die bei konventionellen Systemen den verschiedenen Hierarchiestufen der Steuerungspyramide zugeordnet sind, werden auf die Entitäten des Internet der Dinge (Module, TE, Dienste) verteilt. Übergeordnete Steuerungsinstanzen (z.B. Materialflussrechner) entfallen.

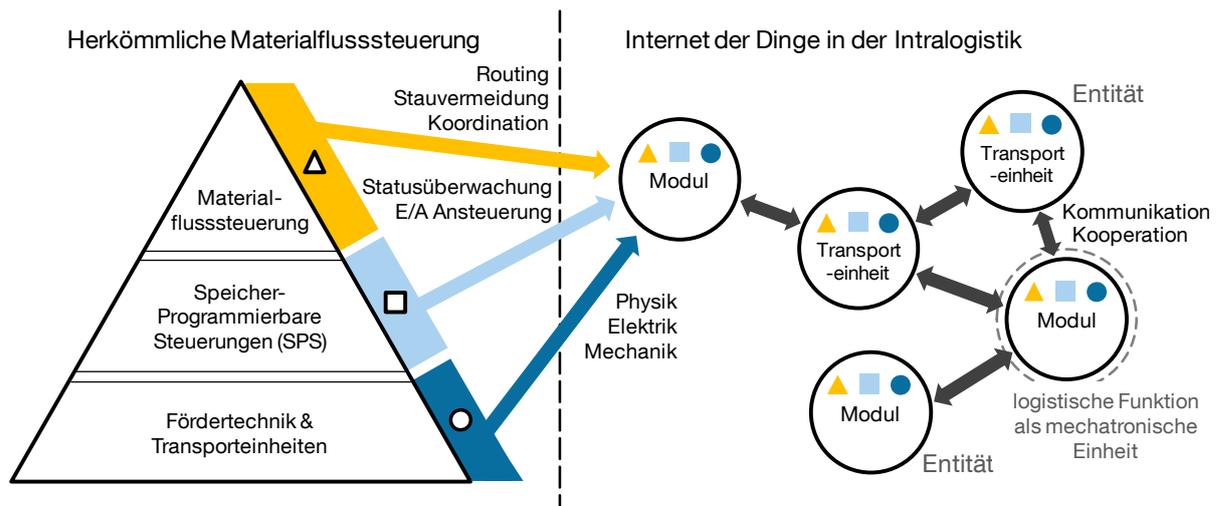


Abbildung 2-5: Ein *Internet der Dinge in der Intralogistik* ermöglicht hierarchielose Materialflusssysteme auf Basis kooperierender Entitäten (in Anlehnung an [Gün-2008c, S. 494])

Agentensysteme

Zur Verteilung der Steuerungsintelligenz werden Softwareagenten¹⁵ genutzt, welche den einzelnen Transporteinheiten, Modulen und Diensten zugeordnet sind und die deren Zielstellungen (z.B. Nutzung/Erbringung von Diensten) situationsabhängig in einem Agentensystem¹⁶ repräsentieren. Die *VDI/VDE-Richtlinie 2653 Agentensysteme in der Automatisierungstechnik* definiert Agentensystem wie folgt [VDI/VDE 2653-1, S. 3]:

„Ein Agentensystem besteht aus einer Menge von Agenten, die interagieren, um gemeinsam eine oder mehrere Aufgaben zu erfüllen.“

Jede Entität soll durch den ihr zugeordneten Softwareagenten in die Lage versetzt werden, ihre Umwelt (Materialflusssystem) wahrzunehmen, die gewonnenen Informationen zu verarbeiten und auf dieser Grundlage ihre spezifische Aufgabe zu erfüllen. Ein umfangreicher Datenaustausch innerhalb des Agentensystems ist v.a. für höhere Funktionen der Fördertechnikmodule (z.B. Auftragsdisposition, Wegplanung) notwendig. Die Steuerungslogik der Module ist – anders als bei Transporteinheiten und Diensten – in zwei Schichten aufgeteilt, von welchen nur eine durch den Softwareagenten realisiert wird. Grund dafür sind die stark unterschiedlichen Aufgabengebiete der Modullogik [Chi-2010, S. 26]. Einerseits muss das Modul zur Kommunikation und Interaktion mit anderen Entitäten sowie zu einer dezentralen Entscheidungsfindung fähig sein. Diese Aufgabe übernimmt der Modulagent als Bestandteil eines Agentensystems. Eine weitere Aufgabe des Fördertechnikmoduls ist die Steuerung und Überwachung des physikalischen Prozesses in Echtzeit. Da Softwareagenten i.d.R. in einer nicht-echtzeitfähigen Laufzeitumgebung (Windows, Linux, etc.) ausgeführt werden, sind sie für diese Aufgabe nicht geeignet. Für diesen Teil der Modullogik werden daher Steuerungsprogramme in Programmiersprachen nach IEC-61131-3 eingesetzt, welche speziell für den Einsatz in echtzeitfähigen Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) konzipiert sind [IEC 61131-3].

¹⁵ Ein *Softwareagent* ist ein eigenständiges Softwareprogramm, das, basierend auf Informationen aus der Umgebung, internen Regeln (Verhaltensweisen) und einem internen Weltmodell, selbstständig Entscheidungen treffen kann, um vorgegebene Ziele zu erreichen (vgl. [Jen-2001; Woo-2002]). Eine gute deutschsprachige Einführung zum Thema Softwareagenten bietet [Lie-2007].

¹⁶ Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff *Agentensystem* gemäß der VDI/VDE-Richtlinie 2653 anstelle der ebenfalls üblichen Bezeichnung *Multiagentensystem* verwendet. Die VDI/VDE-Richtlinie 2653 begründet diese Begriffswahl folgendermaßen: „Der Begriff ‚Multiagentensystem‘ ist eine unzutreffende Übersetzung des englischen Begriffs ‚multi-agent system‘. Die deutsche Übersetzung von ‚multi-agent system‘ ist Agentensystem.“ [VDI/VDE 2653-1, S. 3]

Um beide Steuerungsschichten dem Prinzip der funktionsorientierten Modularisierung folgend auf dem Fördertechnikmodul zu vereinen, kommen Embedded-PCs zum Einsatz. Diese stellen eine Mischform aus Industrie-PC und (Soft-)SPS dar und erlauben sowohl die Ausführung von Programmen in Hochsprachen (C#, Java), wie sie i.d.R. zur Implementierung von Softwareagenten genutzt werden, als auch von Steuerungsprogrammen in IEC-61131-Sprachen. Der Datenaustausch zwischen den beiden Schichten erfolgt über eine Middleware [Chi-2010, S. 31; Kuz-2010, S. 77]. Zwar existieren erste Ansätze, Softwareagenten auf konventionellen Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) zu realisieren [Bus-1996; Wan-2008; Wan-2010], wodurch die beschriebene Zweischichtarchitektur aufgelöst werden könnte. Diese bieten allerdings noch nicht die erforderliche Leistungsfähigkeit für eine Anwendung zur dezentralen Steuerung von Materialflusssystemen und werden daher bei der Umsetzung eines Internet der Dinge in der Intralogistik nicht berücksichtigt.

Die eingesetzten Softwareagenten basieren auf Standards der Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) [FIPA-2009], welche für verschiedene Aspekte der Agentenmodellierung, -kommunikation und -interaktion gelten und den Anforderungen an eine agentenbasierte Gestaltung der Materialflusssteuerung genügen [Gün-2010a, S. 99; Chi-2010; Lib-2011]. Die Softwareagenten sind als JADE-Agenten ausgeführt [Bel-2007; JADE]. Das JADE-Framework erlaubt die Implementierung FIPA-konformer Agentensysteme.

Einsatz von RFID

Zur Verortung von Steuerungslogik auf Transporteinheiten (logistische Objekte) kommen RFID-Transponder zum Einsatz. Die RFID¹⁷-Technologie erlaubt nicht nur eine berührungslose automatische Identifikation (*AutoID*) wie die in der Logistik weitverbreitete Barcode-Technologie, sondern ermöglicht darüber hinaus eine Kopplung von Informations- und Warenfluss, da zusätzliche Daten zu Status, Ziel und Route direkt am Transportgut gespeichert werden können [Hom-2006a; Hom-2006b]. Auftragsrelevante Informationen befinden sich somit prozessnah am zu fördernden Gut und geben die Schritte des abzuarbeitenden Workflows vor.

Die Daten befinden sich auf einem elektronischen Datenspeicher, dem sogenannten *Transponder (RFID-Tag)*. Dieser besteht aus einer Antennenspule und einem Chip.

¹⁷ RFID – *Radio Frequency Identification*

Der Datenaustausch basiert auf elektromagnetischen Feldern und erfolgt über spezielle Schreib-/Lesegeräte. Es wird zwischen aktiven und passiven RFID-Transpondern unterschieden. Passive Transponder beziehen die für den Lesevorgang benötigte Energie über elektromagnetische Induktion vom Lesegerät. Aktive Transponder besitzen eine eigene Stromversorgung. Bei der Verwendung von passiven RFID-Tags müssen die assoziierten Softwareagenten auf separater Hardware abseits der Transporteinheit betrieben werden. Auch diese Hardware kann wiederum dezentral verteilt werden und sich an Entscheidungspunkten wie Weichen oder Übergabepunkten befinden. Erst eine ausreichende Rechenkapazität auf den Transporteinheiten würde das direkte Mitführen des Softwareagenten erlauben (z.B. als Agent-on-Tag, vgl. [Net-2010]).

Auf europäischer Ebene weisen zwei Verbundprojekte auf die wachsende Bedeutung eines Internet der Dinge in seinen unterschiedlichen Ausprägungen hin [Sun-2010; IoT-A]. Im EU-Projekt *Internet of Things – Architecture (IoT-A)* ist die Anwendungsdomäne Logistik eines von fünf Geschäftsszenarien, die auf dem Weg zu einem einheitlichen architektonischen Referenzmodell zur Gewährleistung der Interoperabilität von Systemen, Protokollen, Schnittstellen und Algorithmen des Internet der Dinge untersucht werden [IoT-A]. Anstelle von Softwareagenten wird im Rahmen des IoT-A-Projekts allgemein von *virtual entities* (virtuellen Entitäten) gesprochen, wodurch der konkreten Umsetzung der Internet-der-Dinge-Architektur mehr Freiraum eingeräumt wird.

Die Selbststeuerung intralogistischer Fahrzeugkollektive, die den Betrachtungsgegenstand dieser Dissertation darstellt, basiert auf den in diesem Abschnitt eingegrenzten Gestaltungs- und Steuerungsprinzipien eines Internet der Dinge in der Intralogistik. Somit stellen selbststeuernde Fahrzeugkollektive hierarchielose Materialflusssysteme auf Basis autonomer, kooperierender Entitäten dar. Die autonomen mobilen Transportroboter, aus welchen sich selbststeuernde Fahrzeugkollektive zusammensetzen, sind demnach als (Fördertechnik-)Module für das Internet der Dinge zu verstehen (Abbildung 2-6). Im Folgenden wird die Bezeichnung *Internet der Dinge* synonym für das *Internet der Dinge in der Intralogistik* verwendet.

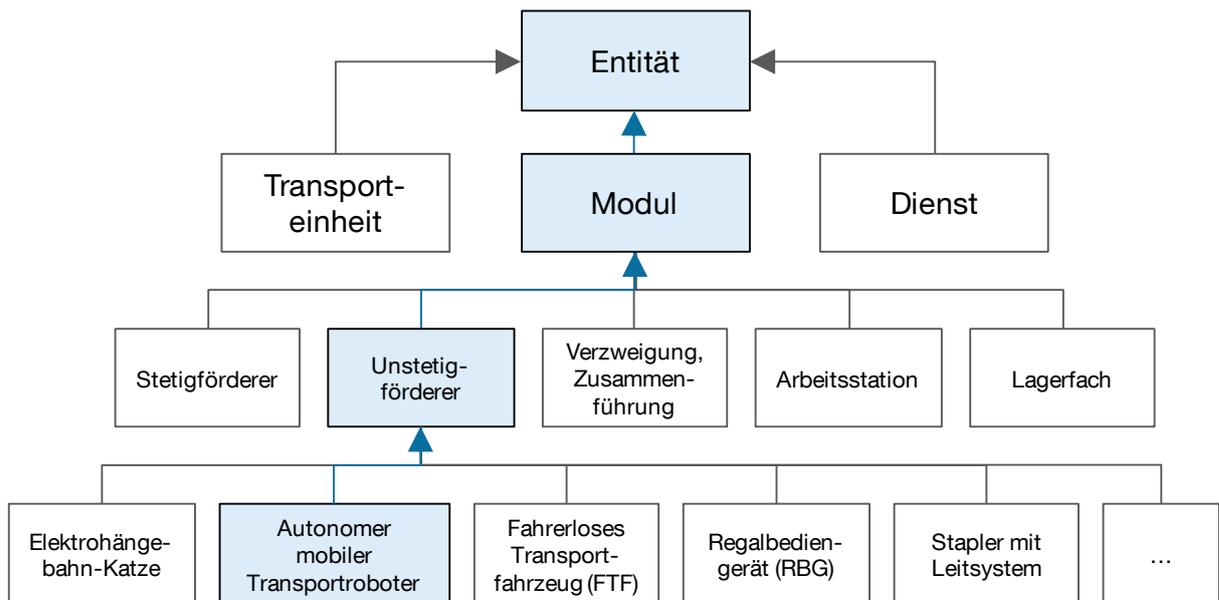


Abbildung 2-6: Einordnung autonomer mobiler Transportroboter als Modul im Klassendiagramm des *Internet der Dinge in der Intralogistik* (in Anlehnung an [Gün-2010a, S. 102])

2.2.4 Wirtschaftlichkeit wandelbarer Materialflusssysteme

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Materialflusssystemen ist neben deren Anschaffungs- und Betriebskosten vor allem die logistische Leistungsfähigkeit¹⁸ ein entscheidender Einflussfaktor. Für wandelbare Materialflusssysteme nach dem Internet-der-Dinge-Prinzip erfolgt die Leistungsmessung noch auf Basis von Simulationsmodellen, da reale Anlagen, die alle Kriterien einer komplett dezentralen Steuerung durch ein Agentensystem erfüllen (vgl. Abschnitt 2.2.3), derzeit nicht existieren. Bisherige Vergleiche zwischen konventionell und dezentral gesteuerten Materialflusssystemen ließen im Normalbetrieb keine wesentlichen Leistungsunterschiede erkennen [Nop-2009; Nop-2011, S. 16-18]. Vor diesem Hintergrund treten bei der vergleichenden Bewertung der Wirtschaftlichkeit beider Alternativen andere Faktoren wie Wandelbarkeit, Robustheit und Wiederverwendbarkeit in den Vordergrund. Auf diesen Feldern weist ein Internet der Dinge Vorteile auf (Abbildung 2-7).

Kosteneinsparungen ergeben sich durch das Internet-der-Dinge-Konzept demnach v.a. in der Entwicklungs- und Realisierungsphase durch eine hohe Wiederverwendbarkeit der modularen Mechanik und Steuerungslogik sowie bei Änderungen im An-

¹⁸Die logistische Leistungsfähigkeit kann durch die Merkmale *Lieferqualität*, *Lieferzeit*, *Lieferflexibilität*, *Lieferfähigkeit*, *Termintreue* und *Informationsbereitschaft* beschrieben werden [Hom-2011, S. 186].

lagenlayout (Umbau, Erweiterung) aufgrund einer gesteigerten Wandelbarkeit [Gün-2008a; Kuz-2010].

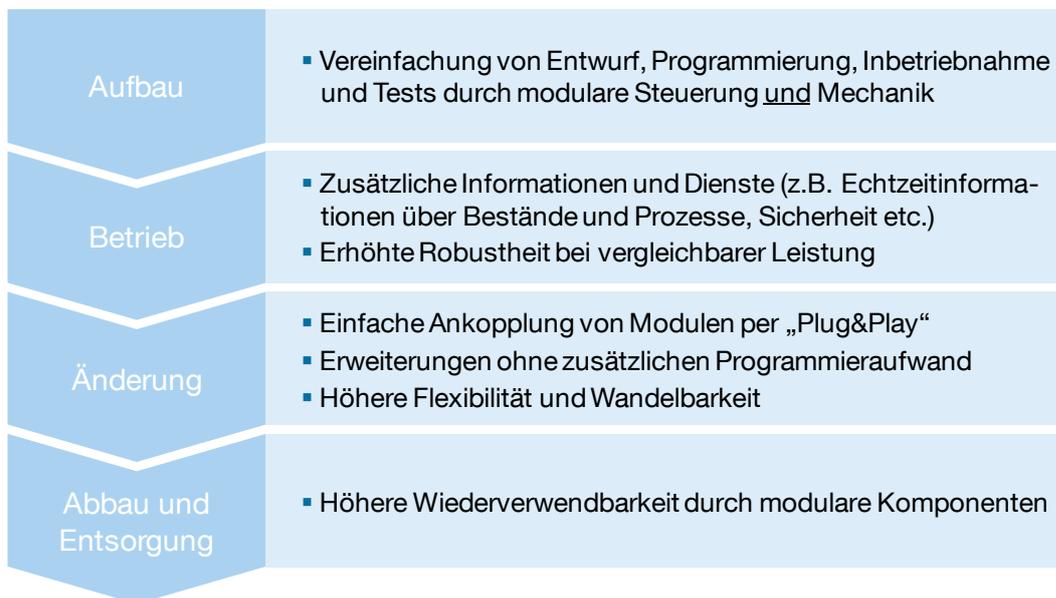


Abbildung 2-7: Vorteile des Internets der Dinge im Lebenszyklus eines Materialflusssystems (in Anlehnung an [Kuz-2010, S. 153ff; Nop-2011, S. 2])

Nopper [Nop-2011] führt in seiner Arbeit basierend auf einer von ihm entwickelten Methodik zur monetären Bewertung von Wandelbarkeit in der Intralogistik einen Vergleich zwischen Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) mit konventioneller und dezentraler¹⁹ Steuerung durch. Ergebnis der Gegenüberstellung der kumulierten Investitions- und Betriebskosten beider Alternativen ist ein Kostenvorteil der selbststeuernden Lösung [Nop-2011, S. 148-154]. Ökonomische Gesichtspunkte stehen einer Selbststeuerung intralogistischer Systeme nach dem Internet-der-Dinge-Prinzip somit nicht entgegen. Vielmehr ist zu erwarten, dass derartige Systeme bei einem Einsatz in einem Umfeld mit sich rasch verändernden Rahmenbedingungen erhebliche Kostenvorteile mit sich bringen.

2.2.5 Praktische Umsetzungen wandelbarer Materialflusssysteme

Dezentralisierte Steuerungsarchitekturen und modular aufgebaute Materialflusssysteme stellen einen aktuellen Betrachtungsfokus von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Intralogistik dar. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über

¹⁹ Ein dezentral gesteuertes FTS entspricht einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv.

die wesentlichen Forschungsaktivitäten in diesem Themenfeld sowie über relevante Umsetzungen wandelbarer Materialflusssysteme in der Praxis.

Wandelbare Materialflusssysteme in der Forschung

Am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen (FLW) der Universität Dortmund werden in mehreren Projekten dezentrale Steuerungskonzepte für komplexe Materialflusssysteme entwickelt und auf fördertechnische Versuchsanlagen angewendet. Das DFG-Forschungsprojekt *Realtime Logistics* [Hom-2005] untersucht die echtzeitnahe Steuerung von Stetigfördersystemen auf Basis autonomer Softwareagenten. Ein weiteres Projekt beschäftigt sich mit Methoden und Regeln zur Gestaltung agenten-gestützter, dezentraler Steuerungen für den Einsatz in komplexen Materialflusssystemen [Hom-2009]. Zum Testen der Steuerungskonzepte steht am Lehrstuhl FLW eine aus einzelnen Fördertechnikmodulen aufgebaute Versuchsanlage zu Verfügung [Hom-2004]. Durch Kommunikation und Kooperation sind die einzelnen Module in der Lage, die Transporteinheiten ohne zentrale Steuerungseinheit zu deren Ziel zu routen. Eine simulative Untersuchung am Lehrstuhl FLW befasst sich zudem mit der dezentralen Steuerung einer Gepäckförderanlage mit 150 Quellen und 100 Senken [Fol-2008]. 2.000 Softwareagenten steuern in der Simulationsumgebung die Gepäckförderanlage und erzielen dabei eine logistische Leistung, die mit der dem Szenario zugrunde liegenden, herkömmlich gesteuerten Realanlage eines internationalen Flughafens vergleichbar ist. Dafür benötigen die Agenten lediglich 400 Codezeilen, was einer deutlichen Reduzierung gegenüber dem Umfang zentraler Steuerungsprogrammen entspricht [Hom-2008].

Der Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (**fml**) der Technischen Universität München verfügt über eine mittels Softwareagenten dezentral gesteuerte Versuchsanlage, welche auf einem Elektrohängebahnsystem (EHB), zwei Rollenförderern und einer Roboterzelle basiert [Chi-2010, S. 131ff; Kuz-2010, S. 133ff]. Die konzeptionellen und technischen Grundlagen für dieses selbststeuernde Materialflusssystem wurden am Lehrstuhl **fml** seit Ende der 1990er Jahre im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte erarbeitet [Bam-2000; Han-2000; Gün-2004; Gün-2006b]. Die Anlage setzt das Konzept einer funktionsorientierten Modularisierung (vgl. Abschnitt 2.2.2) um, d.h. jedes Fördertechnikmodul übernimmt eine komplett eigenständige Aufgabe im Gesamtsystem und verfügt über vordefinierte, einheitliche Schnittstellen für Elektrik, Mechanik und Datenaustausch. Um die zur Ausführung seiner Aufgabe erforderlichen Informationen (z.B. Topologie) zu erhalten, kommuniziert der Modul-

Agent mit seiner Umgebung. Diese Umgebung wird durch andere Softwareagenten repräsentiert. Mit dem erhöhten Informationsbedarf der einzelnen Akteure eines dezentral gesteuerten Systems geht eine erhöhte Kommunikationslast innerhalb des Systems einher. Um den Datenaustausch zu bündeln und zu reduzieren, wird ein spezieller Softwaredienst eingeführt, der für andere Agenten als Datenaustauschplattform dient (*Blackboard*) [Chi-2010, S. 63ff]. Dieses Entwurfsmuster wird in der vorliegenden Arbeit zu einer Komponente des erarbeiteten Kommunikationskonzepts für selbststeuernde Fahrzeugkollektive weiterentwickelt (vgl. Abschnitt 5.3).

Am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) am Karlsruher Institut für Technologie existiert unter der Bezeichnung *Flexförderer* ein aus baugleichen und dezentral gesteuerten Modulen bestehendes Stetigfördersystem [Ber-2009; Fur-2009; May-2009]. Die Einzelmodule können Behälter in Längs- und Querrichtung fördern und verfügen über einheitliche mechanische, elektrische und steuerungstechnische Schnittstellen. Benachbarte Module werden nach dem *Plug-and-Play-Prinzip* automatisch erkannt. Dadurch verkürzen sich die Inbetriebnahmezeiten. Zudem ist eine Skalierung des Systems oder der Austausch defekter Module mit geringem Aufwand zu realisieren. Jedes Einzelmodul generiert ein eigenes Abbild der realen Anlagentopologie in Form einer Routingtabelle. Die Behälter führen die Identifikationsnummer (ID) ihres Zielmoduls auf einem RFID-Tag gespeichert mit sich und werden blockadefrei durch das Streckennetz geroutet. Das System wird mittlerweile unter der Bezeichnung *FlexConveyor* durch die Firma Gebhardt Fördertechnik produziert und vertrieben [GEB-2012]. Zusammen mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft entwickelte das IFL im Rahmen eines kooperativen Forschungsprojekts außerdem das aus mobilen Transportrobotern bestehende Materialflusssystem *KARIS (Kleinskaliges Autonomes Redundantes IntralogistikSystem)*, Abbildung 2-8) [Hip-2009]. Die Fahrzeuge können selbstständig Behältertransporte durchführen oder sich zu Clustern zusammenschließen, um auf diese Weise entweder größere Ladungsträger (z.B. Paletten) befördern zu können oder zeitweise als modularer Stetigförderer höhere Durchsätze auf aktuell hochfrequentierten Routen zu bewältigen.

Am Institut für Fördertechnik (IFT) der Universität Stuttgart werden aktuell gemeinsam mit der Götting KG zwei Fördersysteme auf Basis autonomer Kleinfahrzeuge entwickelt [Weh-2012a; Weh-2012b]. Die Gestaltung der Fahrzeuge zielt auf ein möglichst günstiges Verhältnis von Nutzlast zu Eigengewicht ab. Daher sind die Fahrzeuge sehr kompakt und entweder für die Aufnahme von Kleinladungsträgern

(KLT) oder für die Aufnahme von Paletten optimiert. Das KLT-Fahrzeug (KaTe, *Kleine Autonome Transporteinheit*, Abbildung 2-8) besitzt ein passives Lastaufnahmemittel und ist auf den Transport von Standardbehältern (400 x 600 mm) mit einer Nutzlast von bis zu 40 Kilogramm spezialisiert. Das System besteht aus einer Vielzahl gleichartiger Fahrzeuge, die spurgeführt (z.B. mittels optischer Leitlinie) Transportaufträge abarbeiten, welche ihnen durch ein übergeordnetes Leitsystem oder den Benutzer zugewiesen werden. Für den Palettentransport kommen je zwei baugleiche Fahrzeuge zum Einsatz, die als *Doppelkufensystem* bezeichnet werden, da sie die Bauform von Gabelzinken aufweisen (Abbildung 2-8). Die Kufen-Fahrzeuge können in Europaletten (800 x 1200 mm) einfahren und diese anheben. Die Synchronisation zwischen den beiden Kufen erfolgt mittels einer Funkverbindung.

Das Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) der Leibniz Universität Hannover untersucht aktuell die durch Informationstechnik unterstützte Vernetzung von einzelnen Fördertechnikmodulen zu einem automatisierten, kognitiven Logistiknetzwerk [COG-2012]. Das so entstehende Netzwerk soll die Komplexität der Organisation, Steuerung und Überwachung der eingesetzten Fördertechnikmodule reduzieren. Das modulare Stetigförderkonzept fokussiert derzeit einheitliche, einzeln ansteuerbare Schwenkrollen, die zu einer Fördermatrix zusammengeschlossen werden [Ove-2010]. Im Rahmen des Forschungsprojekts findet auch die Untersuchung der dezentralen Steuerung von Unstetigförderern mittels einer adaptiven Ablaufsteuerung am Beispiel von Transportfahrzeugen in einem Cross-Docking-Zentrum statt [Hei-2011a]. Darüber hinaus beschäftigt sich ein aktuelles Projekt am ITA mit der dezentralen, auf Softwareagenten basierenden Selbststeuerung in FTS [Ove-2011]. Konkrete Projektergebnisse liegen zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht vor.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 637 *Selbststeuerung logistischer Prozesse* untersucht das Bremer Institut für Produktion und Logistik (BIBA) die dezentrale Bereitstellung entscheidungsrelevanter Informationen für die Steuerung logistischer Prozesse [Hül-2007]. Ziel sind adaptive logistische Prozesse mit der Fähigkeit zur Selbststeuerung. Unter *Selbststeuerung* wird die dezentrale Koordination autonomer logistischer Objekte in einer hierarchielosen Organisationsstruktur verstanden. Die Autonomie der logistischen Objekte wie Stückgüter und Ladungsträger wird durch neue IuK-Technologien (z.B. RFID, drahtlose Kommunikationsnetze) ermöglicht. Obwohl der SFB 637 Lösungen für die Transportlogistik fokussiert, können

aus den Ergebnissen der Grundlagenforschung übertragbare Erkenntnisse für die vorliegende Arbeit abgeleitet werden (vgl. hierzu [Sch-2007b; Sch-2010a]).

Wandelbare Materialflusssysteme in der Praxis

Neben den vorgestellten Versuchsanlagen bietet die Industrie bereits vereinzelt fördertechnische Anlagen an, die mit geringem Aufwand modular erweiterbar sind und auch dezentrale Steuerungskonzepte umsetzen. So nutzt das Fördertechniksystem der Firma Servus Intralogistics²⁰ autonom navigierende, schienengebundene Transportroboter für den Warentransport [NN-2011]. Die Fahrzeuge werden als *Autonomous Robotic Carrier* (ARC) bezeichnet [Jun-2011]. Diese Bezeichnung unterstreicht die zunehmende Bedeutung von Algorithmen und Technologien der Robotik für die Gestaltung zukunftsfähiger Materialflusssysteme, die einen sehr hohen Automatisierungsgrad bei gleichzeitig maximaler Flexibilität aufweisen sollen. In diesem Fall sorgt der Einsatz autonomer Transportroboter für eine hohe Layout- und Durchsatzflexibilität, da das Schienennetz ohne Programmieraufwand skalierbar ist und jederzeit Roboter in das System aufgenommen oder aus ihm entfernt werden können.

Ein weiteres innovatives Förder- und Sortiersystem, das auf autonomen Schienenfahrzeugen basiert, stellt das Beumer *autover*-System dar [BEU-2012]. Es handelt sich um eine Gepäckförderanlage, bei der die Gepäckstücke durch angetriebene Fahrzeuge an ihr Ziel gebracht werden. Ein Zentralrechner versorgt die Fahrzeuge mit Aufträgen. Um eine selbstständige Abarbeitung der Aufträge zu ermöglichen, ist jedes der Fahrzeuge mit einem Routenmanager ausgestattet. Die Energie- und Informationsübertragung erfolgt berührungslos über das Schienennetz. Auf diese Weise kann jedes Fahrzeug mit dem Leitsystem und den anderen Fahrzeugen kommunizieren. Die erste Installation erfolgte 2001 am Flughafen Münster-Osnabrück [Hep-2007, S. 285].

Beim System *THINGtelligence* handelt es sich um eine Entwicklung der Firma Lanfer CARGO-Technik, welche aus dem BMBF-Forschungsprojekt *Internet der Dinge* (vgl. Abschnitt 2.2) hervorgegangen ist [LAN-2012]. Es handelt sich um eine modular aufgebaute Stetigförderanlage, bei der die Steuerung der Fördertechnikmodule und das

²⁰ Bei der Firma *Servus Intralogistics* handelt es sich um ein Joint Venture der österreichischen Heron-Gruppe und der Schweizer Swisslog AG.

Routing der Transporteinheiten durch miteinander kommunizierende und kooperierende Softwareagenten implementiert sind. Die Identifizierung von Fördergütern sowie die Bestimmung der spezifischen Transportziele erfolgt alternativ mittels RFID oder Barcode.

Um ein ebenfalls modular aufgebautes und mit Robotern betriebenes Lagerkonzept handelt es sich beim System *Autostore* der Firma Jakob Hatteland Logistics [Mar-2011; HAT-2012]. Die Waren werden von Roboterfahrzeugen, die sich schienengebunden auf der Oberseite eines Aluminiumgerüsts (*Grid*) in einem rechtwinkligen Raster bewegen können, transportiert sowie ein-, aus- und umgelagert. Zu diesem Zweck sind die Roboter mit einem Kran ausgestattet, mit dessen Hilfe die Behälter angehoben und abgesenkt werden können. Für den Zugriff auf Waren aus tiefer gelegenen Ebenen müssen darüber platzierte Behälter zunächst entfernt werden. Durch diesen Mechanismus ergibt sich automatisch eine Platzierung häufig angeforderter Produkte in den oberen Ebenen. Fällt ein Roboter aus, so übernehmen die weiteren Roboter selbstständig dessen Aufgaben. Das System gewinnt somit aufgrund seines modularen Aufbaus an Robustheit und Zuverlässigkeit.

Im *Mobile Fulfillment System* der Firma Kiva Systems transportieren kleine Fahrroboter mobile Lagerregale direkt an den Kommissionierarbeitsplatz [Gui-2008]. Bei der Wegfindung sind sie lediglich an ein Raster aus 3D-Barcodes auf dem Hallenboden gebunden. Die Steuerung der Fahrzeuge erfolgt durch ein Agentensystem, welches auf einem zentralen Server läuft. Der Lagerroboterhersteller Kiva Systems hat das Mobile Fulfillment System in den USA bereits erfolgreich bei verschiedenen Handelsunternehmen installiert und steht kurz vor der Übernahme durch das Internethandelsunternehmen Amazon [GOL-2012].

In automatisierten Lagern finden zunehmend *Shuttlesysteme* Verwendung [Hei-2011b; Sch-2011]. Shuttlesysteme bestehen aus Fahrzeugen mit integriertem Lastaufnahmemittel (*Shuttles*), die sich auf Schienen in den Regalebenen zu einzelnen Lagerplätzen bewegen können. Die einzelnen Shuttles sind je nach Ausführung entweder an eine Ebene gebunden und übergeben das Transportgut direkt an einen Aufzug am Gassenende, oder sie benutzen Vertikalförderer zum Ebenenwechsel.

Die Firma Dematic entwickelte in Kooperation mit dem Fraunhofer IML unter der Bezeichnung *Multishuttle* ein mittels Softwareagenten gesteuertes Shuttlesystem [Jun-2004; Sch-2005]. Die Steuerungsagenten laufen dabei auf einem zentralen Server. Das System wird für eine niedrige bis mittlere Umschlagsleistung in einer Version

angeboten, welche den Fahrzeugen den Ebenenwechsel durch spezielle Shuttle-Lifte erlaubt [Mar-2011; DEM-2012]. Das Multishuttle-System gewährt ein hohes Maß an Durchsatzflexibilität, da das System bei verändertem Leistungsbedarf durch das Hinzufügen oder Entfernen von Shuttles mit geringem Aufwand in seiner Leistungsfähigkeit skaliert werden kann. Eine Weiterentwicklung dieses Shuttlesystems ist das System *Multishuttle Move* [Kam-2011] (Abbildung 2-8). In diesem System verfügen die Shuttlefahrzeuge sowohl über ein Regal- als auch ein Bodenfahrwerk und können sowohl Transporte innerhalb der Lagerregale als auch außerhalb der Lagerstruktur durchführen. Die Flurförderzeuge ersetzen somit konventionelle, fest installierte Fördertechnik in der Lagervorzone und verfügen gleichzeitig über einen direkten Zugriff auf sämtliche Lagerfächer eines Hochregallagers. Auf diese Weise können die autonomen Flurförderzeuge den kompletten Materialfluss zwischen einzelnen Lagerfächern und Kommissionierstationen abbilden. Dieses Szenario liegt einer Versuchsanlage am Fraunhofer IML zugrunde [Kam-2011]. Dort kommen derzeit 50 Shuttlefahrzeuge im Testbetrieb zum Einsatz, der Aufschluss über geeignete Konzepte, Technologien und Algorithmen zur Organisation, Steuerung und Navigation eines derartigen Fahrzeugkollektivs geben soll.

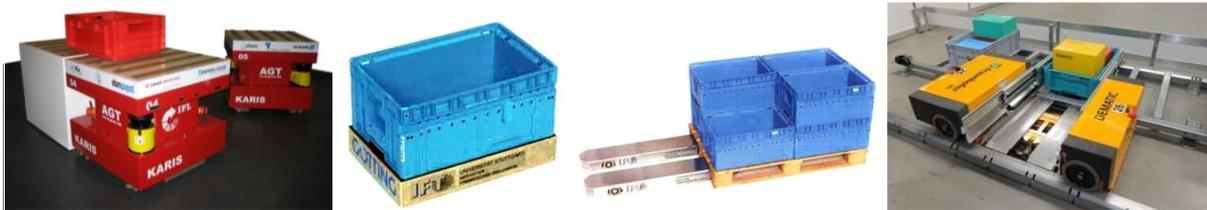


Abbildung 2-8: Prototypische Umsetzungen kleinskaliger Flurförderzeuge: KARIS, KaTe, Doppelkufensystem, Multishuttle Move (v.l.n.r., Bildquellen: IFL, IFT/Götting, IML/Dematic)

Der vorangegangene Abschnitt zeigt auf, dass wandelbare, selbststeuernde Materialflusssysteme bereits wiederholt in Form von Versuchsanlagen an Forschungsinstituten aber ebenso als erste industrielle Systeme realisiert sind und sich somit bereits an der Schwelle zu einem breiten industriellen Einsatz befinden. Darüber hinaus lässt sich ein Trend in Richtung selbststeuernder Flurförderzeuge und deren Einsatz in Verbänden aus vielen baugleichen Einzelfahrzeugen erkennen. Die Entwicklung eines geeigneten Kommunikationskonzepts für derartige selbststeuernde Fahrzeugkollektive ist Gegenstand dieser Arbeit. Das folgende Kapitel widmet sich daher den Grundlagen der Kommunikationstechnik sowie der Kommunikation in Fahrerlosen Transportsystemen sowie der Car-to-X-Kommunikation. Beide Anwendungsgebiete

technischer Kommunikationssysteme sind für die Konzeptentwicklung im Rahmen der vorliegenden Arbeit relevant.

3 Grundlagen und relevante Anwendungen der Kommunikationstechnik

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines angepassten Konzepts für die Kommunikation zwischen autonomen Flurförderzeugen, Peripherieeinrichtungen und übergeordneten Ebenen in wandelbaren und auf selbststeuernden Fahrzeugkollektiven basierenden Materialflusssystemen. Zu Beginn dieses Abschnitts werden die theoretischen Grundlagen zu technischen Kommunikationssystemen anhand geeigneter Modelle (z.B. *ISO/OSI Referenzmodell*) erläutert sowie die Begriffe *Daten* und *Informationen* voneinander abgegrenzt, um deren Bedeutung im Rahmen dieser Arbeit festzulegen (Abschnitt 3.1). Anschließend werden zwei relevante Anwendungsgebiete der Kommunikationstechnik vorgestellt. Zunächst ist in diesem Zusammenhang die Kommunikation in Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) aufgrund deren in Abschnitt 2.1.2 dargelegter Ähnlichkeit zu selbststeuernden Fahrzeugkollektiven von Interesse (Abschnitt 3.2). Abschließend wird auf aktuelle Entwicklungen der *Car-to-X-Kommunikation* eingegangen (Abschnitt 3.3). Da der Datenaustausch zwischen Kraftfahrzeugen ähnliche Problemstellungen wie die Kommunikation in einem Kollektiv aus Flurförderzeugen aufweist, können vorhandene Lösungsansätze der Car-to-X-Kommunikation in das zu entwickelnde Kommunikationskonzept einfließen.

3.1 Kommunikationsmodelle

Als Voraussetzung für die Optimierung des Informationsprozesses in Materialflusssystemen gilt es, die im System vorhandenen Informationen zu strukturieren und in ein Kommunikationsmodell zu überführen [Arn-2009, S. 330]. Kommunikationsmodelle für den technischen Datenaustausch werden zur Unterscheidung von sozialen Kommunikationsprozessen auch als *Nachrichtenübertragungsmodelle* bezeichnet. Das in Abbildung 3-1 dargestellte Nachrichtenübertragungsmodell nach Shannon und Weaver [Sha-1949] zeigt die Bestandteile eines Kommunikationssystems nach dem Sender-Empfänger-Modell auf.

Das Modell unterstützt ein strukturiertes Vorgehen bei der Gestaltung eines technischen Kommunikationssystems, indem es zwischen Informationsquellen und Sendern sowie zwischen Empfängern und Zielpunkten unterscheidet und zusätzlich

Störquellen für die Signalübertragung berücksichtigt. Informationsquellen und Zielpunkte können beispielsweise Datenbanken und Softwareagenten als logische Kommunikationspartner sein, während Sender und Empfänger die technische Kommunikationsschnittstelle zwischen verschiedenen (Rechner-)Systemen darstellen (z.B. Sende- und Empfangsantenne). Der Nachrichtenaustausch zwischen zwei Kommunikationspartnern setzt eine korrekte Entschlüsselung der übertragenen Signale²¹ auf Empfängerseite voraus. Nur so kann der Empfänger an den Nachrichteninhalte (Daten, Informationen) gelangen.

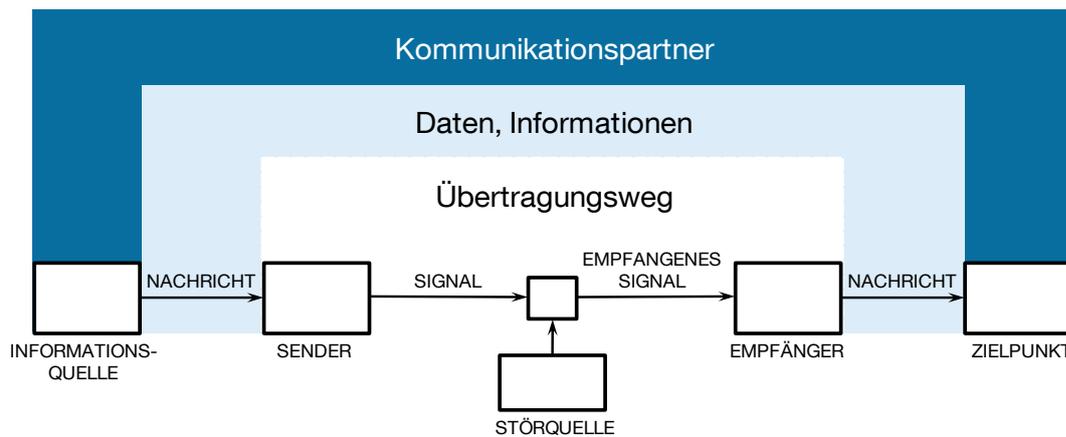


Abbildung 3-1: Nachrichtenübertragungsmodell nach Shannon und Weaver (in Anlehnung an [Sha-1949, S. 5])

Übertragen auf ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv sind die logischen Kommunikationspartner Softwareagenten von Modulen (autonome Transportroboter und periphere Einrichtungen wie z.B. Lastübergabestation, Ladestationen), Diensten und Transporteinheiten. Die Kommunikationsteilnehmer können gleichzeitig als Informationsquellen und -senken fungieren. Spezialisierte Softwareagenten wie Visualisierungsdienste oder Datenlogger treten lediglich als Zielpunkte der Nachrichtenübertragung auf.

Die Kommunikation in einem Agentensystem kann prinzipiell als direkte Nachrichtenübermittlung (*Message-Passing, Peer-to-Peer*²²-Kommunikation) oder indirekt über eine Datenaustauschplattform (*Blackboardsystem*) realisiert werden [Bre-1998; Chi-2010, S. 63; Gün-2010a, S. 74ff]. Auf Vor- und Nachteile beider Modelle geht Abschnitt 5.3 ein. Ein Blackboardsystem entkoppelt Sender und Empfänger, wäh-

²¹ Signal – zeitlicher Verlauf einer physikalischen Größe [Bau-1991]

²² von engl. *peer* ‚Gleichgestellter‘

rend bei der Peer-to-Peer-Kommunikation die Informationsquelle Nachrichten entweder gezielt an vorab bekannte Empfänger (Uni-/Multicast) sendet oder per Broadcast alle Empfänger adressiert. In letzterem Fall müssen die einzelnen Empfänger entscheiden, ob die in der Nachricht enthaltenen Daten für sie relevant sind (und somit einen Informationswert aufweisen) oder nicht. Diese Unterscheidung zwischen *Daten* und *Informationen* verdeutlicht Abbildung 3-2. Eine Information entsteht, wenn der Empfänger die erhaltenen Daten sinnvoll interpretieren kann, während Daten einer regelbasierten Zusammenstellung von Zeichen oder Signalen nach einer vorgegebenen Syntax entsprechen [Reh-1996]. Informationen sind somit auf einen bestimmten Kontext bzw. Verwendungszweck ausgerichtete Daten [Bop-2008; Krc-2010].

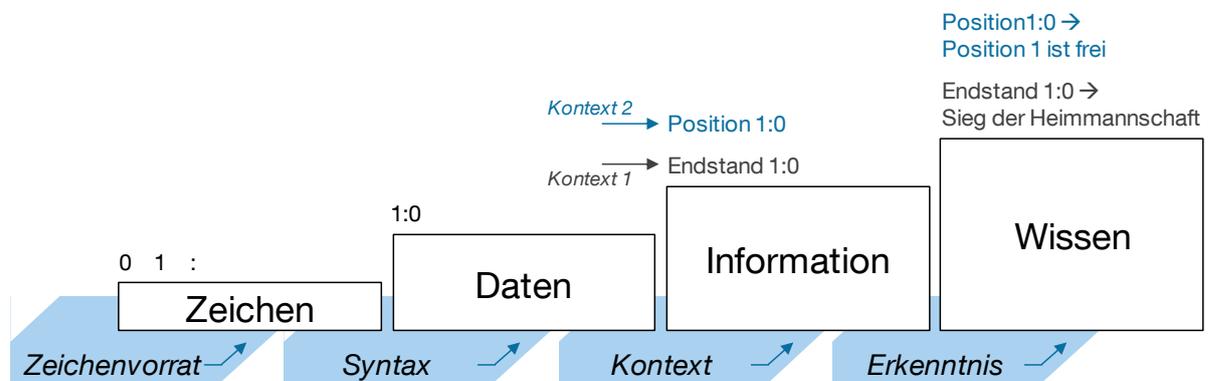


Abbildung 3-2: Hierarchischer Zusammenhang zwischen den Begriffen *Zeichen*, *Daten*, *Information* und *Wissen* (in Anlehnung an [Reh-1996, S. 7] und [Bop-2008, S. 22])

In der vorliegenden Arbeit werden die Begriffe *Daten* und *Informationen* gemäß dieser Abgrenzung verwendet. Welche Informationen für den effizienten Betrieb eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs systemintern ausgetauscht werden müssen, untersucht Abschnitt 4.3 der vorliegenden Arbeit. Auf welche Weise die Informationen ihre Empfänger erreichen, ist Gegenstand der Abschnitte 5.2 und 5.3.

ISO/OSI Referenzmodell

Ein Kommunikationsnetzwerk besteht nicht nur aus einer Architektur (Topologie, Übertragungsmedium, Zugriffsverfahren), sondern benötigt zusätzlich einen Regelsatz zur Steuerung der Kommunikation zwischen verschiedenen Systemen. Das seit 1979 von der *International Standardization Organisation* (ISO) entwickelte und seit 1983 standardisierte Schichtenmodell *Open System Interconnection* (OSI) ist als Referenzmodell für herstellerunabhängige Kommunikationssysteme konzipiert

[ISO/IEC 7498-1]. Dieses Modell ermöglicht eine logische Aufteilung komplexer Gesamtzusammenhänge beim Datenaustausch zwischen zwei Endsystemen. Es sieht den Aufbau von Kommunikationssystemen in sieben hierarchischen Schichten (engl. *layer*) vor (Abbildung 3-3), schreibt aber keine konkrete Ausgestaltung der einzelnen Ebenen vor. Die unteren vier Schichten sind rein *transportorientiert*, während die drei oberen Schichten die übermittelten Daten für Anwendungen aufbereiten (*anwendungsorientiert*).

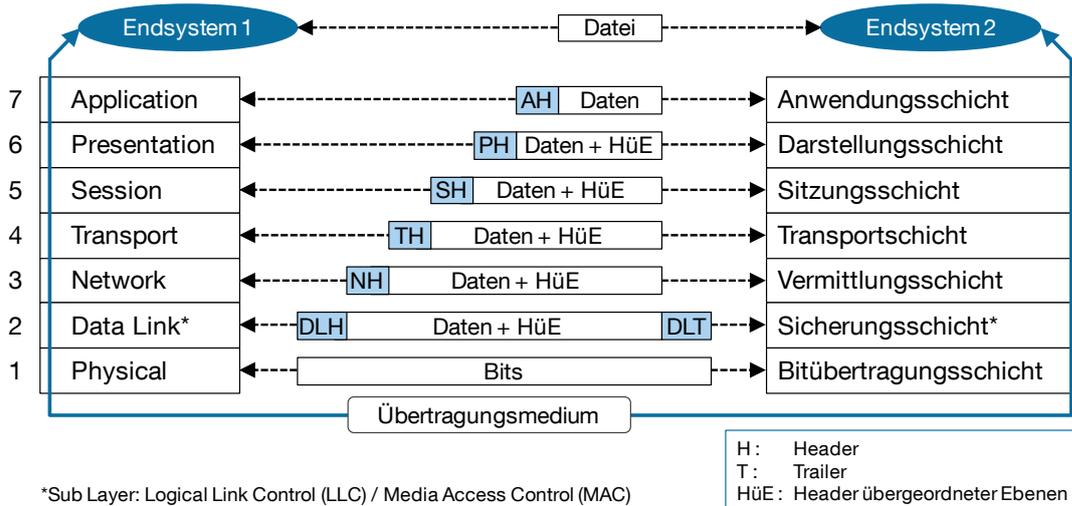


Abbildung 3-3: ISO/OSI Referenzmodell

Anforderungsbeschreibungen grenzen die Aufgaben der einzelnen Schichten ab. Die Anwendungsschicht (engl. *Application Layer*) gewährleistet Anwendungen (Programme und Benutzer) den Zugriff auf das Netzwerk. Die Darstellungsschicht (engl. *Presentation Layer*) ermöglicht den korrekten Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Systemen, indem sie die systemabhängige Darstellung der Daten in eine unabhängige Form umsetzt und bei Bedarf zwischen verschiedenen Datenformaten übersetzt. Weitere Aufgaben sind die Kompression und Verschlüsselung der Daten.

Die Sitzungsschicht (engl. *Session Layer*) stellt Dienste für einen organisierten und synchronisierten Datenaustausch zur Verfügung und sichert auf diese Weise die Prozesskommunikation zwischen zwei Systemen. Um Zusammenbrüche der Sitzung zu beheben, werden in dieser Schicht Prüfpunkte in die Daten eingefügt, welche als Anknüpfungspunkte zur Fortführung der Sitzung nach dem Ausfall einer Transportverbindung dienen. Die Transportschicht (engl. *Transport Layer*) stellt zwei miteinander kommunizierenden Anwendungsprozessen eine einheitliche und lückenlose Ende-zu-Ende-Datenübertragung bereit und sorgt dafür, dass die anwendungsorientierten

Schichten die in den unteren Schichten verwendeten Übertragungsmedien nicht berücksichtigen müssen. Weitere Aufgaben sind die Segmentierung des Datenstroms und die Flusskontrolle.

Die Vermittlungsschicht (engl. *Network Layer*) unterstützt die Datenübertragung über das gesamte Kommunikationsnetzwerk hinweg, indem sie Datenpakete weitervermittelt, netzwerkübergreifende Adressen bereitstellt und das Routing zwischen den Netzwerkknoten übernimmt. Die Sicherungsschicht (engl. *Data Link Layer*) gewährleistet eine weitgehend fehlerfreie Datenübertragung und regelt den Zugriff auf das Übertragungsmedium. Der Bitdatenstrom wird in Rahmen (engl. *frames*) aufgeteilt und um eine Prüfsumme ergänzt, die es dem Empfänger ermöglicht, fehlerhafte Datenblöcke zu erkennen. Die Bitübertragungsschicht (engl. *Physical Layer*) definiert die elektrische, mechanische und funktionale Schnittstelle zum Übertragungsmedium.

Für jede Schicht existieren *Kommunikationsprotokolle*, die Regeln zu Syntax, Semantik und Synchronisation für den Datenaustausch mit den benachbarten Schichten festlegen. Da das ISO/OSI Referenzmodell, wie oben erwähnt, die konkrete Umsetzung der einzelnen Schichten offen lässt, haben sich für sämtliche Schichten etliche unterschiedliche, auf konkrete Einsatzfelder zugeschnittene Protokolle entwickelt. Während der Datenübermittlung von einer Anwendung zu einer anderen erhalten die Nutzdaten in jeder Schicht vorgeschaltete Steuerinformationen (z.B. Zieladressen, Routinginformationen), die im sogenannten *Header* mitgeführt werden und folglich die zu übertragende Datenmenge erhöhen. Weitere Zusatzinformationen enthält der ebenfalls mit den Nutzdaten übertragene *Trailer*. Diese Bitfolge wird in der Sicherungsschicht am Ende des Datenpakets angehängt. Auf der Empfängerseite dienen die Header-Informationen zum stufenweisen Entpacken der Anwendungsdaten, während der Trailer Informationen zum Erkennen und Korrigieren von Übertragungsfehlern enthält. Unterschiedliche Netzwerkprotokolle weisen unterschiedliche Datenstrukturen in Headern und Trailern auf, was direkten Einfluss auf den Anteil an Zusatzdaten hat, welche in einem Netzwerk übertragen werden müssen. Diesen Umstand gilt es bei der Auswahl von Kommunikationsstandards zu berücksichtigen.

TCP/IP Referenzmodell

Beim *TCP/IP Referenzmodell* handelt es sich um ein spezielles, vier Schichten umfassendes Referenzmodell. Die beiden namensgebenden Protokolle *Transmission Control Protocol (TCP)* und *Internet Protocol (IP)* sind die am häufigsten genutzten Protokolle der Internet-Protokollfamilie. Tabelle 3-1 stellt die Schichten des TCP/IP-Modells jenen des ISO/OSI Referenzmodells gegenüber und ordnet diesen exemplarisch einen Protokollstapel der Internet-Protokollfamilie zu. Auf allen Ebenen des Protokollstapels existieren alternative Protokolle, die auf unterschiedliche Anwendungsfälle zugeschnitten sind. So kann in der Transportschicht das verbindungsorientierte Protokoll TCP durch das verbindungslose Protokoll UDP (*User Datagram Protocol*) ersetzt oder in der Anwendungsschicht das Protokoll HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), das dem Übertragen von HTML-Seiten dient, anstelle des Datenaustauschprotokolls FTP (*File Transfer Protocol*) genutzt werden.

Tabelle 3-1: Beispielhafter Protokollstapel der Internet-Protokollfamilie

Protokoll	OSI Schicht	TCP/IP Schicht
FTP	Anwendung	Anwendungen
TCP	Transport	Transport
IP	Vermittlung	Internet
IEEE 802.3u	Sicherung	Netzzugang
Ethernet	Bitübertragung	

In ihrer Funktion als Designgrundlage für Protokolle in Rechnernetzwerken unterstützen die beiden vorgestellten Referenzmodelle ein strukturiertes Vorgehen bei der Entwicklung eines Kommunikationskonzepts für den rechnerbasierten Datenaustausch in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv. Die beiden folgenden Abschnitte stellen Kommunikationssysteme für technische Systeme mit mobilen Kommunikationspartnern vor, die in einigen Aspekten als Muster für das angestrebte Kommunikationskonzept dienen können. Es handelt sich um Fahrerlose Transportsysteme (Abschnitt 3.2) und die Car-to-X-Kommunikation vernetzter Kraftfahrzeuge (Abschnitt 3.3).

3.2 Kommunikation in Fahrerlosen Transportsystemen

Der Datenaustausch in Fahrerlosen Transportsystemen (vgl. Abschnitt 2.1.2) zwischen stationärer Leitsteuerung, sonstigen ortsfesten Einrichtungen und den Fahrerlosen Transportfahrzeugen erfolgt durch spezialisierte Kommunikationssysteme [VDI 2510]. Dabei stellt die Mobilität der Transportfahrzeuge die systeminterne Kommunikation vor vergleichbare Herausforderungen, wie sie für ein selbststernendes Fahrzeugkollektiv charakteristisch sind. Die Bedeutung, die dem Kommunikationssystem eines Fahrerlosen Transportsystems zukommt, beschreibt die Richtlinie wie folgt [VDI 2510, S. 35]:

„Um die Funktion der Gesamtanlage sicherzustellen, ist in allen Betriebssituationen für eine ordnungsgemäße Abwicklung der Datenübertragung zu sorgen. Möglicherweise auftretende Übertragungsfehler müssen durch geeignete Maßnahmen kompensiert werden.“

Als Leistungskriterien eines Datenübertragungssystems definiert die Richtlinie *Reaktionsgeschwindigkeit* und *Übertragungsdauer* [VDI 2510]. Diese Kriterien sind abhängig von den Faktoren *Übertragungsgeschwindigkeit*, *Zuverlässigkeit des Übertragungsverfahrens* sowie *Prozedur und Protokoll der Datenübertragung* [VDI 2510]. In Fahrerlosen Transportsystemen wird für den Datenaustausch zwischen stationären und mobilen Kommunikationspartnern häufig auf eine *berührungslose Datenübertragung* zurückgegriffen. Als berührungslose Übertragungstechniken kommen in Fahrerlosen Transportsystemen

- Kommunikationsschleifen im Boden für einen induktiven Datenaustausch,
- Infrarot,
- Schmalbandfunk (z.B. 433 MHz) oder
- Breitbandfunk (z.B. WLAN²³ nach IEEE 802.11)

zum Einsatz. Die genannten Techniken lassen sich abhängig von ihrem Wirkungsbereich als punktbezogen, streckenbezogen oder flächendeckend klassifizieren [VDI 2510].

²³ WLAN – *Wireless Local Area Network*

Induktive Techniken erlauben nur eine punkt- oder streckenbezogene Datenübertragung. Aufgrund dieser starken Einschränkung ist Induktion als Datenübertragungsprinzip in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv nicht geeignet. Zudem steht die fixe Installation von Kommunikationsschleifen im Hallenboden im Gegensatz zu der in Abschnitt 2.2.1 formulierten Forderung nach größtmöglicher Layoutflexibilität. Lediglich auf definierten Hauptstrecken oder im Falle schienengebundener Fahrtanteile könnte Induktion zur Erweiterung der Übertragungsleistung in Ergänzung zu einer flächenbezogenen Kommunikationstechnik genutzt werden.

Die Datenübertragung per *Infrarot* zählt zu den optischen Übertragungsverfahren und kann für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, als Richtstrecke oder flächendeckend im Weitwinkelbereich eingesetzt werden. Infrarot ist somit prinzipiell für einen Einsatz in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv geeignet. Allerdings bestehen auch bei optischen Verfahren wie Infrarot aufgrund der erforderlichen Sichtverbindung zwischen den Teilnehmern Einschränkungen hinsichtlich der Layoutflexibilität. Aus diesem Grund wird die Infrarot-Technik im weiteren Gang der Untersuchung nicht näher betrachtet.

Funklösungen gehören wie optische Technologien der Gruppe drahtloser Übertragungsverfahren an und bieten i.d.R. ebenfalls einen flächendeckenden Wirkungsbereich. Da für die Datenübertragung per Funk keine Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger erforderlich ist, ist ein funkbasiertes Kommunikationssystem auch gegenüber Veränderungen im Layout der Fördertechnikmodule flexibel, solange diese die Grenzen der verfügbaren Funkzellen nicht überschreiten. Kommen Kommunikationsprotokolle zum Einsatz, die sogenanntes *Multihopping* (Nutzung von Zwischenknoten auf dem Weg zum Zielpunkt) erlauben, kann auch unabhängig von Funkzellen zwischen den Teilnehmern kommuniziert werden.

Aufgrund der genannten Potenziale und der weiten Verbreitung von Funklösungen im industriellen Bereich werden ausgewählte Funkstandards in Abschnitt 5.2.1 umfassend hinsichtlich ihrer Eignung als Basistechnologie eines Kommunikationskonzepts für selbststeuernden Fahrzeugkollektive analysiert.

3.3 Car-to-X-Kommunikation

Exemplarisch für die Konzeptentwicklung eines auf die konkreten Anforderungen einer Anwendungsdomäne zugeschnittenen Kommunikationssystems sollen an die-

ser Stelle die Bestrebungen des *Car 2 Car Communication Consortiums*²⁴ (C2C-CC) zur Etablierung eines Datenaustauschstandards für Automobile im Straßenverkehr aufgezeigt werden. Die Bezeichnung *Car-to-X-Kommunikation* (C2X) umfasst den Datenaustausch zwischen mehreren Kraftfahrzeugen (*Car-to-Car* (C2C), engl. *Vehicle-to-Vehicle* (V2V)) sowie zwischen Kraftfahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur (*Car-to-Infrastructure* (C2I), engl. *Vehicle-to-Roadside* (V2R)) [C2C-2007]. Die C2X-Kommunikation weist somit strukturelle Analogien zum Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit – der Kommunikation in selbststeuernden Fahrzeugkollektiven – auf.

Die allgemeine Bezeichnung für Netzwerke der C2X-Kommunikation lautet *Vehicular Ad-hoc Networks* (VANET) [Sen-2011]. Als Netzwerkknoten in VANETs kommen On-Board-Units (OBU, Funkknoten am Fahrzeug) sowie Road-Side-Units (RSU, Funkeinrichtungen an stationärer Verkehrsinfrastruktur) zum Einsatz. Der Datenaustausch erfolgt über WLANs gemäß des *IEEE-Standards 802.11p*²⁵ [Jia-2008]. Zwischen On-Board- und Road-Side-Units, die sich in gegenseitiger Funkreichweite befinden, bildet sich automatisch ein lokales Funknetzwerk aus. Die Kommunikationspartner in einem solchen Netzwerk können untereinander Daten austauschen, gleichzeitig aber ebenso Nachrichten an andere Teilnehmer weiterleiten. Auf diese Weise können auch Netzwerkknoten miteinander kommunizieren, die sich nicht in gegenseitiger Funkreichweite befinden. Der Informationsaustausch über C2X-Netzwerke soll u.a. einen stockungsfreien Verkehrsfluss fördern und Autofahrer frühzeitig vor gefährlichen Straßen- und Verkehrsverhältnissen in ihrer unmittelbaren Umgebung warnen (Unfallprävention).

Für die oberen Schichten der C2X-Kommunikation sowie für ergänzende Dienste existieren ebenfalls IEEE-Standards, welche zusammen mit dem Standard IEEE 802.11p den sogenannten *WAVE*²⁶-*Protokollstapel* bilden (Tabelle 3-2) [Uzc-2009].

²⁴ Zusammenschluss europäischer Automobilhersteller, Zulieferer und Forschungseinrichtungen

²⁵ IEEE 802.11p unterstützt die US-amerikanische Version von *Dedicated Short Range Communications* (DSRC, Frequenzband: 5,85 - 5,925 GHz), welche explizit für die Kommunikation in sogenannten *Intelligent Transportation Systems* (ITS) vorgesehen ist. Da daneben eine europäische DSRC-Version existiert, die zur elektronischen Mauterhebung genutzt wird, hat sich in Europa die Bezeichnung *ITS-G5* für die US-Version von DSRC etabliert.

²⁶ WAVE – *Wireless Access for Vehicular Environment*

Tabelle 3-2: WAVE-Protokollstapel

	Bezeichnung	Funktion
IEEE 1609.1	<i>Resource manager</i>	unterstützt die Kommunikation zwischen Remote-Anwendungen und Fahrzeugen
IEEE 1609.2	<i>Security services</i>	Sicherheitsdienste für den Austausch von Anwendungs- und Managementdaten
IEEE 1609.3	<i>Networking services</i>	Standard für den WAVE Network Layer
IEEE 1609.4	<i>Multichannel operation</i>	ermöglicht Mehrkanalbetrieb
IEEE 802.11p		Anpassung von IEEE 802.11 an verkehrsspezifische Anforderungen

WAVE-Datenpakete enthalten neben den Nutzdaten einen Zeitstempel und die per GPS ermittelte Position des Senders. Anhand dieser Zusatzinformationen kann der Empfänger Gültigkeit und Relevanz erhaltener Datenpakete überprüfen. Angelehnt an den WAVE-Protokollstapel wird vom C2C-CC ein offener Industriestandard für die C2X-Kommunikation im europäischen Raum angestrebt. Das vor diesem Hintergrund im Jahr 2007 verabschiedete *CAR 2 CAR Communication Consortium Manifesto* [C2C-2007] sieht verpflichtend getrennte Kommunikationskanäle für den Austausch verschiedener Informationsarten vor.

Das C2C-CC unterscheidet zwischen vier Informationsarten: Datenpakete zur reinen Netzwerkkontrolle (*Control Channel*), Nachrichten für sicherheitskritische Anwendungen (z.B. Unfallwarnungen), Informationen zur Verkehrssicherheit und -effizienz (z.B. Daten zur Verkehrsdichte auf der geplanten Route) sowie der Datenaustausch für nicht sicherheitskritische Anwendungen. Die beiden erstgenannten Datenarten weisen ein geringes Datenvolumen bei hoher Dringlichkeit auf. Die beiden weiteren Datentypen sind durch ein höheres Datenvolumen bei gleichzeitig geringerer Dringlichkeit gekennzeichnet.

Insgesamt wurden vom C2C-CC beim *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) sieben Kanäle mit einer Bandbreite von je 10 MHz im Frequenzbereich zwischen 5,875 und 5,925 GHz angefragt. Auf diese Weise könnten Informationsarten mit einem erhöhten Datenaufkommen mehrere Kanäle nutzen. Allerdings stehen derzeit für Car-to-Car-Anwendungen nur fünf Kanäle im Frequenzbereich zwischen 5,875 GHz und 5,905 GHz zur Verfügung [BUN-2009]. Ergänzend ist die Nutzung weiterer öffentlicher Kanäle (z.B. IEEE 802.11a/b/g, Mobilfunknetze) zur

Übertragung von Infotainment-Inhalten vorgesehen. Abbildung 3-4 zeigt den angestrebten C2C-CC Protokollstapel und fasst die möglichen Anwendungsfelder der C2X-Kommunikation zusammen.

Anwendungen

Verkehrseffizienz		
Aktive Sicherheit	Infotainment	
C2C-CC Transport	TCP, UDP, andere	
C2C-CC Network		IPv6
MAC/LCC C2C-CC MAC Erweiterung IEEE 802.11p*	MAC/LCC IEEE 802.11a/b/g	weitere Funkstandards (UMTS, LTE etc.)
PHY IEEE 802.11p*	PHY IEEE 802.11a/b/g	

*europäische Variante des Standards IEEE 802.11p

Abbildung 3-4: C2C-CC Protokollstapel (in Anlehnung an [C2C-2007, S. 33])

In C2X-Netzwerken sollen zunächst nur Hinweisdaten übermittelt werden [C2C-2007]. Der Mensch ist weiterhin als steuerndes Element vorhanden und kann aktiv in den Prozess eingreifen. Dagegen ist die Steuerung eines autonomen Flurförderzeugs in hohem Maße vom Erhalt externer Informationen (z.B. Lastwechselkoordination, Warnmeldungen) abhängig. Ein Ausbleiben benötigter Informationen kann dazu führen, dass ein Fahrzeug seine Aufgabe nicht fortsetzen kann oder in eine Gefahrensituation (z.B. Kollision) gerät. Beide Konsequenzen sind vor dem Hintergrund des prinzipiellen Strebens nach einem zuverlässigen und wirtschaftlichen Betrieb eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs nicht tolerierbar.

Ein weiterer Unterschied zwischen beiden Anwendungsdomänen liegt in den ungleichen Geschwindigkeitsprofilen der jeweiligen mobilen Akteure. Während die Geschwindigkeiten der Teilnehmer in einem Netzwerk aus frei navigierenden Flurförderzeugen in einem intralogistischen Anwendungsszenario (z.B. Distributionszentrum) typischerweise bei ca. 1 m/s liegen, können in einem C2X-Netzwerk Relativegeschwindigkeiten der Kommunikationspartner von bis zu 140 m/s (500 km/h) auftreten. Zudem sind in VANETs Funkreichweiten von mehr als 1.000 m erforderlich, während für die Kommunikation in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv aufgrund dessen eingeschränkten Aktionsraums im innerbetrieblichen Einsatz Funkreichweiten von deutlich weniger als 100 m ausreichen.

Gemein ist beiden Anwendungsdomänen die Forderung nach einer korrekten Bereitstellung prozessrelevanter Informationen innerhalb vorgegebener Fristen. Der maßgebliche Prozess ist in beiden Fällen eine zielgerichtete Fahrt von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt unter den aktuell gegebenen Rahmenbedingungen (Wetter, Verkehrsaufkommen, geplanter Ankunftsstermin etc.). Eine Trennung von Kommunikationskanälen in Abhängigkeit von den zu übertragenden Informationsarten analog zum Ansatz im Kommunikationssystem des C2C-CC ist daher auch für den Datenaustausch innerhalb eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs sinnvoll, um eine hohe Übertragungssicherheit bei sicherheitskritischen Nachrichten zu gewährleisten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die für die C2X-Kommunikation entwickelten Konzepte dem angestrebten Kommunikationssystem für selbststeuernde Fahrzeugkollektive in einigen Aspekten Impulse geben können (z.B. topologie- und geografiebasierte Weiterleitungsalgorithmen für Datenpakete, Organisation und Koordination eines Kommunikationsnetzwerks mit mobilen Teilnehmern) und es sich somit bei VANETs um ein im Rahmen dieser Arbeit relevantes Praxisbeispiel aus einem verwandten Anwendungsfeld handelt.

4 Selbststeuernde Fahrzeugkollektive in der Intralogistik

Als Lösungsansatz für die in Abschnitt 1.2 formulierte Problemstellung einer steigenden Komplexität und Dynamik intralogistischer Prozesse soll ein Kollektiv aus selbststeuernden Flurförderzeugen den innerbetrieblichen Warentransport in Logistiksystemen abbilden. Die Gestaltung und dezentrale Steuerung dieses Fahrzeugkollektivs erfolgt gemäß den Prinzipien einer funktionsorientierten Modularisierung (vgl. Abschnitt 2.2.2) und eines Internet der Dinge in der Intralogistik (vgl. Abschnitt 2.2.3). Dieses neuartige Konzept einer fördertechnischen Anlage bestimmt die Anforderungen und Rahmenbedingungen für ein zweckmäßiges Kommunikationssystem. Die folgenden Abschnitte beschreiben daher Aufbau und Funktionsweise eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs (Abschnitt 4.1) und grenzen dessen Eignung zur Realisierung intralogistischer Prozesse ein (Abschnitt 4.2). Anschließend wird aufbauend auf den möglichen Einsatzfeldern selbststeuernder Fahrzeugkollektive deren Informationsbedarf bestimmt und kategorisiert (Abschnitt 4.3). Abschnitt 4.4 zeigt zwei Referenzszenarien auf, die als Rahmen für die weitere Entwicklung des Kommunikationskonzepts bzw. zu dessen Validierung geeignet sind. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse (Abschnitt 4.5).

4.1 Aufbau und Funktionsweise

Unter dem Begriff *selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv* wird im Rahmen dieser Dissertation ein Verbund aus baugleichen²⁷ autonomen Flurförderzeugen verstanden. Autonome Flurförderzeuge entsprechen gemäß der Systematik der mobilen flurgebundenen Systeme (vgl. Abschnitt 2.1.2, Tabelle 2-2) *autonomen mobilen Robotern*²⁸ [VDI 2510]. Ein Roboter gilt als *autonom*, wenn er ohne steuernde Zugriffe von außen (z.B. durch eine Fernsteuerung) gemäß eigenen Verhaltensregeln handelt [Ste-2002, S. 5]. Den Regelsatz, nach dem ein Roboter autonom Aufgaben löst und dabei auf

²⁷ Denkbar wären auch heterogene Verbünde mit unterschiedlichen spezialisierten Fahrzeugen. Dieser Ansatz ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

²⁸ Das Forschungsgebiet der *Robotik* befasst sich allgemein mit der Entwicklung von Maschinen, die den Menschen bei der Durchführung einer Aufgabe sowohl physisch als auch bei der Entscheidungsfindung ersetzen können [Sic-2010, S. 1].

Umwelteinflüsse reagiert, ist in Form von Steuerungssoftware hinterlegt. Eine Steigerung erfährt die Autonomie von Robotern, wenn zusätzlich Lernalgorithmen zur Aneignung neuer Regelsätze zum Einsatz kommen [Alp-2010]. Ein Roboter gilt als *mobil*, wenn er mit Hilfe von Aktoren einen beliebigen Fortbewegungsmechanismus umsetzen kann und dabei nicht physikalisch an einen fixen Bezugspunkt gebunden ist [Ste-2002, S. 6].

Beide Grundeigenschaften müssen die in dieser Arbeit betrachteten Flurförderzeuge aufweisen, um gemeinsam ein *selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv* bilden zu können. Die selbststeuernden Flurförderzeuge werden daher im Rahmen dieser Arbeit synonym als *autonome mobile Transportroboter* bezeichnet. Der Aufbau der Einzelfahrzeuge kann wie bei Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF, vgl. Abschnitt 2.1.2) in Abhängigkeit vom Einsatzgebiet stark variieren. Daneben können als Gestaltungsbasis der mobilen Transportroboter auch Shuttlefahrzeuge (vgl. Abschnitt 2.2.5) dienen [Kam-2011]. Entsprechend der Kriterien einer funktionsorientierten Modularisierung (vgl. Abschnitt 2.2.2, [Wil-2006]) kapseln die Fahrzeuge alle zur Erbringung ihrer logistischen Funktion benötigten

- mechanischen (z.B. Antrieb, Räder, Lenkung, Lastaufnahmemittel),
- energetischen (z.B. Batterie, Schnittstelle zu Ladestation) sowie
- steuerungstechnischen (z.B. Embedded-PC, Sensoren, Funkknoten)

Komponenten innerhalb ihrer Systemgrenzen (Fahrzeughülle). Der Selbststeuerungsgrad eines Fahrzeugkollektivs hängt von der Ausstattung des zu fördernden Gutes (*logistisches Objekt*) mit Rechenkapazität und steuerungsrelevanten Informationen (z.B. auf einem RFID-Tag) ab. So sieht Scholz-Reiter [Sch-2007a, S. 180] eine Selbststeuerung logistischer Prozesse erst als gegeben an, „*wenn das logistische Objekt Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und -ausführung selbst leistet.*“ Diese Forderung entspricht dem Internet-der-Dinge-Paradigma (Abschnitt 2.2.3). Solange diese Anforderung nicht erfüllt ist, sind zusätzliche Einheiten (z.B. Datenbanken) zur Verknüpfung von Steuerungsparametern und Objekt-ID erforderlich, die einer kompletten Selbststeuerung entgegen stehen.

Ein Konzept für kooperative autonome Flurförderzeuge existiert am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (**fml**) der Technischen Universität München un-

ter der Bezeichnung μ Carrier bzw. *microCarrier* (Abbildung 4-1) [Gün-2008b; Weh-2008].



Abbildung 4-1: Konzeptskizze *microCarrier* bzw. μ Carrier

Der Konzeptskizze liegt die Ausstattung der Fahrzeuge mit zwei Rädern und einem elektronisch geregelten Einzelradantrieb (vgl. Segway Personal Transporter [SEG-2012]) zugrunde. Die autonomen Flurförderzeuge verfügen über einheitliche mechanische und energetische Schnittstellen, über die sie Anbaugeräte (z.B. Gabelzinken) und zusätzliche Sensoren (z.B. 2D-Laserscanner) ankoppeln können. Zudem können sich mehrere Fahrzeuge temporär zu einem Stetigförderer zusammenschließen. Das System ist durch Hinzufügen und Entfernen einzelner Fahrzeuge stark skalierbar.

Im Zusammenhang mit dieser Vision kooperierender autonomer Flurförderzeuge, die sich bei Bedarf zu Clustern [Hip-2009] zusammenfinden, ist die Übertragung eines zielgerichteten Kollektivverhaltens (*Schwarmintelligenz*) nach dem Vorbild biologischer Schwärme auf Verbünde aus autonomen mobilen Robotern [Grä-2009; Dor-2010] von besonderer Bedeutung. Schwarmintelligenz ist ein emergentes Phänomen. Im Bezug auf ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv bedeutet dies, dass sich durch Kollektivverhalten höherwertige Funktionen (z.B. Palettentransport, Sequenzbildung) umsetzen lassen, als dies den Einzelfahrzeugen möglich ist. Auch der Austausch von Sensordaten (z.B. Messwerte eines 2D-Laserscanners) innerhalb des Kollektivs kann als derartiges Phänomen gedeutet werden, da durch eine solche Sensorfusion die Entscheidungsbasis für die dezentrale Steuerung der einzelnen Flurförderzeuge verbessert werden kann und sich somit u.U. die Qualität der Entscheidungen erhöht.

Abbildung 4-2 zeigt exemplarisch für die Forschungsrichtung der Schwarmintelligenz in Robotersystemen eine strukturierte grafische Darstellung organischer Formationen eines Roboterschwarms im EU-Projekt SYMBRION [SYM-2012]. Für den autonomen Zusammenschluss der mobilen, quadratförmigen Roboter zu ebenen

Organismen sind Anwerbsstrategien und eine lokale Kommunikation zur Selbstorganisation des Kollektivverhalten notwendig [Liu-2010]. Die Problemstellung entspricht dem oben erwähnten Zusammenschluss autonomer mobiler Fördertechnikmodule zu einem Stetigfördersystem. Dieses Beispiel zeigt, wie die Entwicklung innovativer Fördertechniksysteme (z.B. selbststeuernde Fahrzeugkollektive) von Ergebnissen und Lösungsansätzen der Roboterforschung profitieren kann.

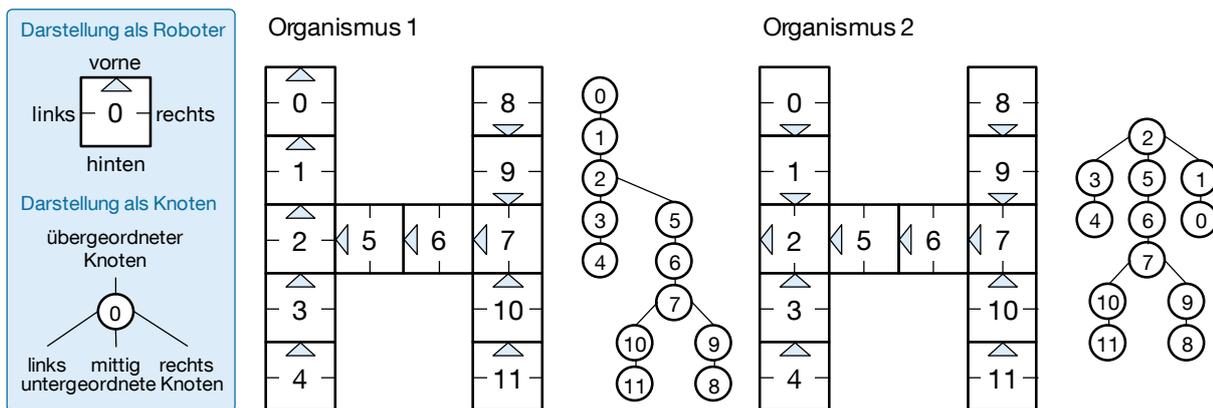


Abbildung 4-2: Grafische Darstellung organischer Strukturen eines Roboterschwarms [Liu-2010]

Die Funktionsweise eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs entspricht prinzipiell der anderer fördertechnischer Anlagen für den Stückguttransport (z.B. Stetigfördertechnik, Querverschiebewagen (QVW), Abbildung 4-3). Auf Basis von Auftragsdaten führen die mobilen Roboter Transporte zwischen Quell- und Zielpunkten durch und realisieren auf diese Weise einen Materialflussgraphen. Jedoch sind sie dabei weder ortsfest noch gleisgebunden und im Gegensatz zu Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) nicht auf umfangreiche Infrastruktur zur Navigation und Daten einer Leitsteuerung angewiesen. Es entsteht ein selbststeuernder und sich selbst organisierender (z.B. Umsetzung von Vorfahrtsregeln, Zusammenschluss zu Transportclustern) Fahrzeugschwarm, der hochgradig layout-, durchsatz- und prozessflexibel ist und über ein hohes Maß an Erweiterbarkeit und Integrationsfähigkeit verfügt (vgl. Abschnitt 2.2.1). Die Fördergutflexibilität ist abhängig von der Gestaltung der Lastaufnahme (passiv/aktiv, Abmaße etc.) sowie von der Fähigkeit der autonomen Flurförderzeuge, in Kooperation mit anderen Fahrzeugen ihr Spektrum an transportierbaren Gütern zu erweitern (z.B. um Paletten, Gitterboxen etc.). Aufgrund dieser hohen Wandelbarkeit und der damit verbundenen Möglichkeit eines *organischen Wachstums* stellen selbststeuernde Fahrzeugkollektive eine mögliche Ausprägung *Zellularer Transportsysteme* nach ten Hompel dar [Hom-2006c].

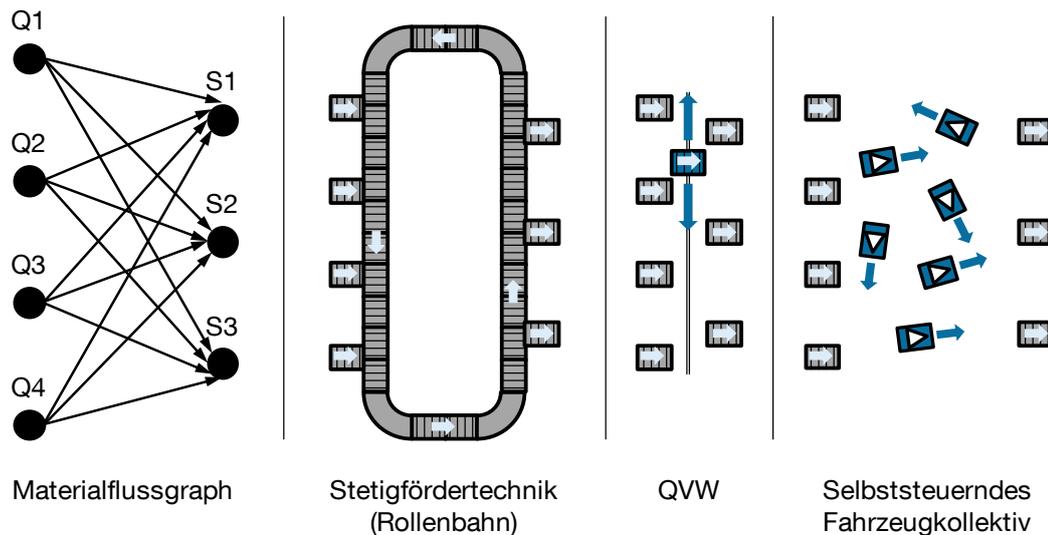


Abbildung 4-3: Verschiedene fördertechnische Realisierungsformen eines Materialflussgraphs

Für Zellulare Transportsysteme (Z. T.) gilt folgende Definition [Hom-2011, S. 351]:

„(engl. Cellular transport systems; auch ‚Zellulare Fördertechnik‘) basieren auf autonomen fördertechnischen ‚Entitäten‘. Dies sind z.B. autonome Transportfahrzeuge (Fahrerlose Transportfahrzeuge²⁹) und/oder autonome Fördertechnikmodule³⁰. Die Kommunikation der Entitäten untereinander erfolgt, wie auch die Steuerung selbst, typischerweise durch (Software-)Agenten. Z. T. sind ‚topologieflexibel‘: Die Anordnung der fördertechnischen Entitäten im Raum (das fördertechnische Layout) kann jederzeit geändert werden. Werden den (bewegten) logistischen Objekten ‚Missionen‘ und Strategien bzw. entsprechende Koeffizienten implantiert, so verfolgen deren Agenten in der Kommunikation mit der Umgebung und untereinander das vorgegebene Ziel selbstständig (z.B. Ein- und Auslagerung, Transport, Sortierung etc.). Auch die gewünschte Emergenz im Sinne einer ressourcenschonenden Zielerfüllung des Z. T. ergibt sich durch Interaktion zwischen den fördertechnischen Entitäten und einer entsprechenden (serviceorientierten) Umgebung selbstständig. Z. T. sind somit intralogistische Systeme höchster Flexibilität.“

²⁹ Anmerkung: Fahrerlose Transportfahrzeuge sind nicht per se autonome Transportfahrzeuge (vgl. Abschnitt 2.1.2, Tabelle 2-2). Daher werden die beiden Bezeichnungen im Rahmen dieser Arbeit nicht synonym verwendet.

³⁰ Ein Zellulares Transportsystem kann somit auch ausschließlich aus ortsfesten Fördertechnikmodulen bestehen, sofern diese in der Lage sind, sich nach dem Plug-and-Play-Prinzip selbstständig zu einem Materialflusssystem zusammenzuschließen.

4.2 Eignung für Prozesse der Intralogistik

Abschnitt 2.1.1 charakterisiert Prozesse und Funktionen intralogistischer Systeme. Im Folgenden wird die Eignung selbststeuernder Fahrzeugkollektive für die technische Abbildung einzelner Funktionen untersucht. Tabelle 4-1 stellt die in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen intralogistischen Funktionen den Fähigkeiten und Eigenschaften selbststeuernder Fahrzeugkollektive gegenüber und bewertet darauf aufbauend die Einsatzmöglichkeiten dieses neuartigen Fördertechniksystems.

Tabelle 4-1: Bewertung der Eignung selbststeuernder Fahrzeugkollektive zur Erfüllung logistischer Funktionen in innerbetrieblichen Materialflussprozessen

	Erläuterung	
Transportieren/ Fördern	Das <i>Fördern</i> bzw. <i>Transportieren</i> von Gütern von einer Quelle zu einem Zielpunkt ist Kernaufgabe der mobilen Transportroboter eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs.	●
Verteilen, Zusammenführen	Das <i>Verteilen</i> bzw. <i>Zusammenführen</i> von Waren kann durch eine gerichtete Koordination des Fahrzeugkollektivs abgebildet werden, von Einzelfahrzeugen nur mit Mehrfach-LAM ³¹ .	◐
Sequenzieren	Eine <i>Sequenzierung</i> von Gütern kann durch das Überholen einzelner Fahrzeuge erreicht werden.	◐
Puffern	<i>Puffern</i> wird durch verlangsamte Fahrt oder Anhalten bei Stauungen an Übergabepunkten abgebildet.	◐
Prüfen	Für den Prozess <i>Prüfen</i> sind die selbststeuernden Fahrzeuge bedingt geeignet, da eine zusätzliche sensorische Ausstattung (z.B. RFID-Antenne, Wiegeeinrichtung) erforderlich ist.	◐
Handhaben	Für den Prozess <i>Handhaben</i> sind die selbststeuernden Fahrzeuge bedingt geeignet, da eine zusätzliche Ausstattung mit einem aktiven LAM bzw. einem Manipulator erforderlich ist.	◐
Ein-/Auslagern	Das <i>Ein- und Auslagern</i> von Gütern stellt eine Kombination aus Handhaben und Fördern dar und kann durch Spezialfahrzeuge mit entsprechendem LAM abgebildet werden.	◐

³¹ LAM – Lastaufnahmemittel

Lagern	Das <i>Lagern</i> von Gütern zieht eine langfristige Belegung einzelner Fahrzeuge nach sich und kann durch ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv nicht wirtschaftlich sinnvoll realisiert werden.	○
Kommissionieren	Der Prozess <i>Kommissionieren</i> wird entweder manuell oder durch spezialisierte Automaten durchgeführt.	○
Verpacken	Der Prozess <i>Verpacken</i> wird entweder manuell oder durch spezialisierte Automaten durchgeführt.	○

- sehr gute Eignung ● gute Eignung ● bedingte Eignung
- schlechte Eignung ○ keine Eignung

Als Kernfunktion erbringen die autonomen Flurförderzeuge eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs Transporte logistischer Objekte von einer Quelle zu einer Senke. Alle weiteren Funktionen entstehen entweder durch das Zusammenspiel des Fahrzeugverbunds (*Kollektivverhalten*, z.B. Verteilen, Zusammenführen, Sequenzieren, Puffern) oder werden durch die Ausstattung der Fahrzeuge mit weiterer Sensorik und Aktorik ermöglicht (z.B. Prüfen, Handhaben, Ein-/Auslagern). Abbildung 4-4 verdeutlicht, wie durch die Erfüllung der Funktion *Fördern* auf Fahrzeugebene die Funktion *Verteilen* auf der Systemebene des selbststeuernden Fahrzeugkollektivs entsteht. Drei Transporteinheiten werden von einer gemeinsamen Quelle aus auf drei verschiedene Senken verteilt. Analog lassen sich die Funktionen *Zusammenführen* und *Sequenzieren* durch das Zusammenspiel mehrerer Einzelfahrzeuge realisieren.

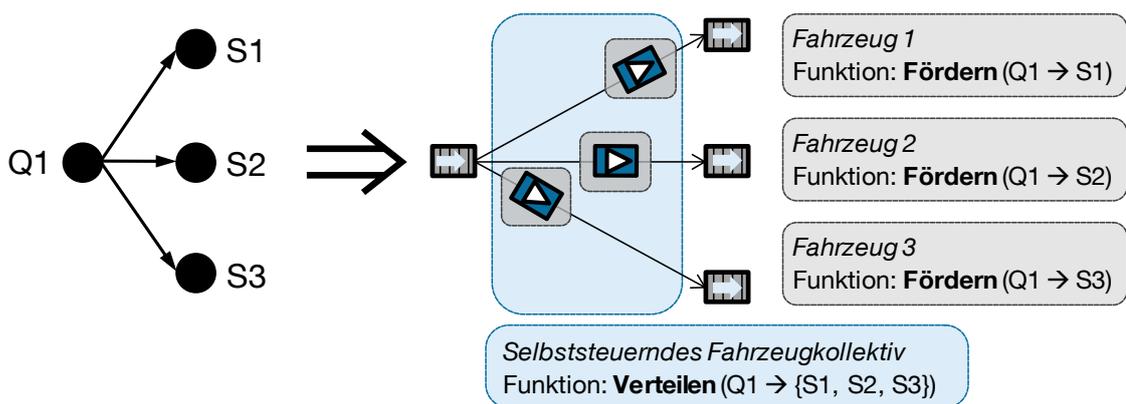


Abbildung 4-4: Umsetzung logistischer Funktionen durch ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv

Die Funktionen Lagern, Kommissionieren und Verpacken lassen sich nicht sinnvoll durch einzelne autonome Flurförderzeuge oder ein Fahrzeugkollektiv abbilden und

werden daher mit spezialisierter Materialflusstechnik (Lager-, Kommissionier-, Verpackungstechnik) umgesetzt (vgl. Abschnitt 2.1.2). Die Materialflusstechnik angrenzender Systeme (Lager, Kommissionier-/Verpackungsbereich) kann allerdings ebenfalls durch Softwareagenten repräsentiert werden, um die Interaktion zwischen den agentengesteuerten Transportroboter einfach und ohne Medienbruch zu ermöglichen.

4.2.1 Anwendungsabhängige Ausstattung der Einzelfahrzeuge

Wie angesprochen können einzelne Fahrzeuge dazu befähigt werden, weitere Funktionen im innerbetrieblichen Materialfluss zu übernehmen (z.B. Wiegen, Identifizieren mit RFID-Lesegerät, Handhaben mit aktivem LAM). Allerdings steigt durch zusätzliche Komponenten sowohl die mechatronische Komplexität der Fahrzeuge als auch das Risiko eines Komponentenausfalls. Zudem wirkt sich zusätzliche Sensorik und Aktorik negativ auf die Kosten pro Transportfahrzeuge aus. Da ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv aus sehr vielen Einzelfahrzeugen (< 100) bestehen kann, wirken sich die Investitionskosten für ein einzelnes autonomes Flurförderzeug stark auf die Kosten des Gesamtsystems aus und sind daher so gering als möglich zu halten.

Diesen Zielkonflikt zwischen Funktionalität und Kosten gilt es anwendungsgerecht zu lösen. Ein Lösungsansatz ist die strikte Beschränkung auf eine einzige Funktion (z.B. Transport von Europaletten) und der Verzicht auf einen hohen Selbststeuerungsgrad. Unter diesem Prämissen lassen sich die Einzelfahrzeuge kompakt, robust und kostengünstig gestalten (vgl. [Weh-2012a; Weh-2012b]). Durch die kompakte Bauweise lässt sich ein günstiges Verhältnis von Nutzlast und Eigengewicht und somit eine effiziente Nutzung der Antriebsenergie erreichen. Aufgrund der geringeren Anschaffungskosten pro Fahrzeug ist eine Erweiterung der Leistungsfähigkeit monofunktionaler Systeme durch das Hinzufügen weiterer Fahrzeuge zudem mit geringeren Kosten verbunden. Allerdings schränkt diese Gestaltungsweise die Flexibilität und Wandelbarkeit des Systems ein, da weiterhin zentrale Steuerungskomponenten und Infrastruktur zur Wegfindung benötigt werden.

Ein zweiter Lösungsansatz sind autonome Flurförderzeuge, die frei navigierend Ladungsträger aufnehmen, abgeben und transportieren [Hip-2009; Kam-2011]. Zur freien Navigation benötigen diese Fahrzeuge zusätzliche, kostenintensive Sensorik. Ziel dieses Ansatzes ist es, die Fahrzeuge mit einem Höchstmaß an Autonomie, Flexibilität (auch hinsichtlich der transportierbaren Güter) und Wandelbarkeit auszustat-

ten, um über den Lebenszyklus des Transportsystems durch die gewonnene Anpassbarkeit an nicht vorab geplante Umfeldbedingungen Einsparungen gegenüber konventionellen Materialflusssystemen zu erreichen. Zudem sollen die Fahrzeuge Schwarmintelligenz aufweisen, was sich in komplexen Steuerungsalgorithmen niederschlägt. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf autonomen Transportrobotern dieser multifunktionalen Ausprägung, da nur aus diesen ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv gemäß der Abgrenzung in Abschnitt 4.1 entstehen kann. Abhängig vom Anwendungsfall (System mit starrem/flexiblem Layout und homogenen/heterogenen Transporteinheiten) bieten beide Lösungsansätze Potenzial für die Gestaltung zukünftiger Materialflusssysteme.

4.2.2 Bereichsübergreifender Einsatz

Für automatisierte Systeme ist ein hoher Auslastungsgrad anzustreben, um deren Vorzüge bezüglich Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit in vollem Umfang zu nutzen und auf diese Weise die Investitionskosten durch Einsparungen bei den Personalkosten und durch erhöhte Erträge in einer möglichst kurzen Zeitspanne auszugleichen. Als eine Möglichkeit, die Auslastung der Einzelfahrzeuge eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs zu steigern, ist deren Einsatz über mehrere Funktionsbereiche hinweg denkbar. Dieser *bereichsübergreifende Einsatz* kann auf zwei Arten geschehen. Entweder wechseln die Fahrzeuge als Springer von einem Funktionsbereich in einen anderen und setzen dort ihre Tätigkeit innerhalb der Bereichsgrenzen fort (z.B. Wechsel zwischen zwei Kommissionierbereichen). In diesem Fall kann der Transfer einzelner Fahrzeuge manuell (z.B. Fahrzeug auf Palette), ferngesteuert oder autonom³² erfolgen.

Alternativ können die Fahrzeuge Warentransporte zwischen verschiedenen Funktionsbereichen übernehmen, wieder unter der Voraussetzung, dass den Fahrzeugen ein selbstständiger Transfer zwischen den Bereichen möglich ist. Hindernisse können hierbei unterschiedliche Bodenbeschaffenheiten, Niveauwechsel zwischen den Bereichen oder fehlende Fahrwege sein. Spezielle Strecken für die autonomen Fahrzeuge zwischen den Funktionsbereichen sind mit einem zusätzlichen Flächenbedarf verbunden. Werden hingegen vorhandene Fahrwege genutzt, so besteht die Gefahr von Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern wie Mitarbeitern oder Flurförder-

³² Sofern geeignete Fahrwege vorhanden sind und dem Fahrzeug die Transferroute bekannt ist.

zeugen, welche beim Design der Fahrzeugsteuerung berücksichtigt werden muss. Gegen einen bereichsübergreifenden Einsatz eines Fahrzeugkollektivs sprechen darüber hinaus weite Distanzen zwischen einzelnen Bereichen. Bei der Fahrt zwischen weit voneinander entfernten Funktionsbereichen sind die einzelnen Fahrzeuge lange Zeit blockiert, wodurch sich der Durchsatz pro Fahrzeug reduziert. Transportfahrten entlang eines unidirektionalen Materialstroms oder reine Bereichswechsel ohne Last führen zudem zu weiten und daher unwirtschaftlichen Leerfahrten.

Einen entscheidenden Einflussfaktor für beide Einsatzformen stellen die in den einzelnen Bereichen verwendeten Ladehilfsmittel (KLT, Paletten, Sonderbehälter, Versandeinheiten, Pakete) dar. Unterscheiden sich diese in Abmessungen oder Struktur, so kann ein bereichsübergreifender Einsatz nur umgesetzt werden, wenn die Flurförderzeuge über entsprechend flexible Lastaufnahmemittel (LAM) oder Kooperationsstrategien (z.B. Palettentransport im Cluster [Hip-2009]) verfügen, um mehrere Typen von Ladehilfsmitteln aufnehmen und transportieren zu können.

Ein hoher Selbststeuerungsgrad des Fahrzeugkollektivs begünstigt Bereichswechsel der Einzelfahrzeuge, da sich deren Bedarf an Infrastruktur zur Unterstützung von Wegfindung, Steuerung und Kommunikation entlang der Verbindungsstrecken auf ein Mindestmaß beschränkt. Mithilfe autonomer Navigationsverfahren (z.B. durch Maschinelles Sehen), Künstlicher Intelligenz (KI) sowie sich selbst organisierender Ad-hoc-Netzwerke (analog zu drahtlosen Sensornetzwerken) für die Kommunikation mit anderen systemrelevanten Akteuren ist zukünftig auch die Gestaltung komplett selbststeuernder Systeme möglich, die in ihrer Domäne ohne externe Infrastruktur agieren können.

Ein Beispiel soll den erwarteten Nutzen eines bereichsübergreifenden Einsatzes verdeutlichen: Die Warenflüsse in der Lagervorzone eines AKL werden durch ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv abgebildet. Gleichzeitig realisieren die Fahrzeuge auf definierten Routen den Materialfluss zwischen Wareneingang, AKL und Warenausgang. Die einzelnen Fahrzeuge passen in diesem Einsatzszenario ihren Einsatzort in Abhängigkeit von aktueller und prognostizierter Auftragslast an. Diese Nutzungsform des Fahrzeugkollektivs ist insbesondere für Distributionszentren mit bereichsabhängigen Durchsatzschwankungen im Tagesverlauf vorteilhaft (Abbildung 4-5). Durch die Möglichkeit der flexiblen Verlagerung von Leistungskapazitäten in Form einzelner Fahrzeuge lassen sich Schwankungen und Spitzenlasten ohne ein

Vorhalten zusätzlicher oder leistungsstärkerer Fördertechnikelemente (*Leistungsreserve*) ausgleichen.

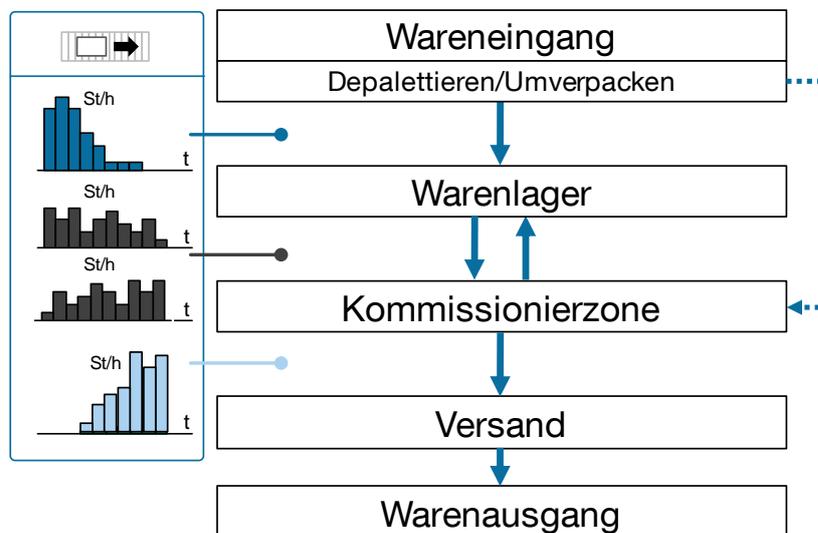


Abbildung 4-5: Bereichswise Schwankungen beim Behälterdurchsatz im Tagesverlauf

Der bereichsübergreifende Einsatz selbststeuernder Fahrzeugkollektive bietet somit das Potenzial, kurzfristige Durchsatzschwankungen in verschiedenen Funktionsbereichen ohne das Vorhalten von Leistungsreserven auszugleichen und gleichzeitig die Auslastung der Einzelfahrzeuge zu verbessern. Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit des bereichsübergreifenden Einsatzes sind für den Einzelfall zu prüfen. Langfristige Veränderungen im Durchsatz (z.B. saisonale Schwankungen oder starkes Wachstum) können über eine Anpassung der Fahrzeuganzahl³³ abgefangen werden. Dieses Potenzial unterstreicht die Durchsatzflexibilität und Skalierbarkeit eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs.

4.3 Informationsbedarf zur Selbststeuerung eines Fahrzeugkollektivs

In diesem Abschnitt werden aus den vielschichtigen Informationen, die in Materialflusssystemen generiert und verarbeitet werden, jene extrahiert, welche für ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv relevant sind (Abschnitt 4.3.1). Anschließend erfolgt eine Klassifizierung der Informationsarten als Ausgangspunkt für die weitere

³³ In diesem Zusammenhang ist das Leasing von Zusatzfahrzeugen als Geschäftsmodell denkbar.

Konzeptionierung eines bedarfsgerechten Kommunikationssystems für selbststeuernde Fahrzeugkollektive (Abschnitt 4.3.2).

4.3.1 Informationen der Materialflusssteuerung

Ein erster Überblick über unterscheidbare Informationsarten in Materialflusssystemen kann aus dem *VDI/VDMA-Richtlinienentwurf 5100* [VDI/VDMA 5100] sowie der *VDI-Richtlinie 2510* [VDI 2510] gewonnen werden (vgl. Abschnitt 2.1.3). Während der *VDI/VDMA-Richtlinienentwurf 5100 Softwarearchitektur für die Intralogistik* (SAIL, vgl. Abschnitt 2.1.3) einen Ansatz zur allgemeingültigen Informationsklassifizierung in Materialflusssystemen enthält, unterscheidet die VDI-Richtlinie 2510 konkret die in einem Fahrerlosen Transportsystem auszutauschenden Daten (vgl. Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Informationen der Materialflusssteuerung (inkl. Abkürzungen) nach [VDI/VDMA 5100] und der FTS-Steuerung nach [VDI 2510]

SAIL – VDI/VDMA 5100	FTS – VDI 2510
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagenstatus (I:FS) ▪ Richtungsinformation (I:DI) ▪ Betriebsparameter (I:OP) ▪ Sensor-Information (I:SI) ▪ Fahrauftrag (I:M) ▪ Transportauftrag (I:TO) ▪ Fahrauftragsanfrage (I:MR) ▪ Transportauftragsquittung (I:TOD) ▪ Fahrauftragsquittung (I:MD) ▪ Transportauftragsstorno (I:TOC) ▪ Fahrauftragsstorno (I:MC) ▪ Überfahrmeldung (I:NO) ▪ Richtungsanfrage (I:DR) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fahrauftrag ▪ Fertigmeldung ▪ Hol-, Bringziele ▪ Batteriezustand ▪ Steuersignale zur Blockstreckensteuerung ▪ auftragspezifische Daten (Fertigungsdurchlauf, Historie) ▪ Steuersignale zur Synchronisation FTF-seitiger Lastaufnahmemittel & stationärer Lastübergabestationen ▪ produktspezifische Daten (Auftragsnummer, Farbcode etc.) ▪ Fahrzeugnummer ▪ Stör- und Fehlermeldungen ▪ Fahrzeugposition ▪ sicherheitsrelevante Steuersignale ▪ Fahrzeugstatus (Beladezustand, Not-Aus etc.) ▪ Steuersignale zu sonstigen peripheren Einrichtungen (Tore, Schranken etc.)

Die Systemsteuerung eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs erfolgt gemäß der Vorgaben eines Internet der Dinge (vgl. Abschnitt 2.2.3) mittels eines Agentensystems. Der Einsatz von Softwareagenten bedingt einen zusätzlichen systeminternen Kommunikationsbedarf. Diese Erhöhung des Kommunikationsaufwands ist auf den zusätzlichen Organisations- und Koordinationsaufwand des Agentensystems sowie

auf Mechanismen der dezentralen Auftragsdisposition zurückzuführen. Ein erweiterter Informationsbedarf in agentengesteuerten Materialflusssystemen nach dem Internet-der-Dinge-Paradigma ergibt sich durch:

- An-/Abmeldung der Softwareagenten bei Systemkomponenten (z.B. Container (vgl. [JADE]), Blackboard)
- Dienstanfragen (z.B. Transportfunktion) durch Softwareagenten der Transporteinheiten (TE)
- Auftragsverhandlungen zwischen Modul-Agenten
- Meldungen der Modul-Agenten über Gebote bzw. Kosten
- Einrichten/Kündigen von Abonnements bei Softwarediensten

Aus dem Informationsbedarf konventioneller Materialfluss- und Fahrzeugsteuerungen nach Tabelle 4-2 und den zusätzlichen Informationen innerhalb eines Agentensystems werden Informationsarten abgeleitet, die für den Betrieb eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs bedeutsam sind. Tabelle 4-3 fasst die ermittelten Informationsarten zusammen und beschreibt deren Inhalte und Eigenschaften. Die Informationsarten lassen sich bereits anhand dieser Auflistung bezüglich ihrer Bedeutung für einen sicheren und effizienten Betrieb eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs in zwei Gruppen einteilen.

Während die Informationsarten *Topologie/Layout*, *Organisation/Koordination*, *Auftragsverhandlungen*, *Transportauftragsdaten*, *Fahrauftragsdaten*, *Reservierungen*, *Identifikationsdaten* und *Lastwechselkoordination* für einen korrekten und verzögerungsfreien Ablauf der logistischen Prozesse relevant sind, sind die Informationsarten *Kollisionsvermeidung*, *Sensordaten*, *Status-/Fehlermeldungen* und *Schaltaufträge* darüber hinaus für ein sicheres und unfallfreies Funktionieren des Fahrzeugkollektivs entscheidend. Die Informationsart *Visualisierungsdaten* umfasst sämtliche Informationen, die der Überwachung und dem Verständnis des Systemverhaltens dienen (z.B. Fahrzeugstatus/-bewegungen, Reservierungen, Layout), und nimmt daher eine gesonderte Stellung im Informationsmodell dar. Prinzipiell übernimmt eine Visualisierung eine Komfortfunktion (aufbereitete Darstellung des Systemverhaltens für den Benutzer). Allerdings können anhand einer Visualisierungsumgebung auch Störungen verhindert oder frühzeitig erkannt und beseitigt werden.

Tabelle 4-3: Informationsarten in selbststeuernden Fahrzeugkollektiven

	Informationsart	Inhalt / Eigenschaften
	Visualisierungsdaten	Positionen, Statusmeldungen, Layout, Reservierungen etc.
	Topologie/Layout	Aggregierte Funktion, sammelt und verteilt Positionsdaten
	Organisation/Koordination	An-/Abmeldung im System, Einrichten/Kündigen von Abonnements ³⁴
	Auftragsverhandlungen	Gebote/Kosten und Rückmeldungen
	Transportauftragsdaten	Auftragsbezogenes Datenkollektiv, Quittierung, Storno
	Fahrauftragsdaten	Aktuelle Position, Koordinaten von Stützpunkten, nächstes Ziel, Storno
	Reservierungen	Zonen, Strecken, Positionen, Aufträge
	Lastwechselkoordination	Datenaustausch zwischen Lastübergabestation und Fahrzeug
	Identifikationsdaten	Per AutoID ausgelesene Daten (<i>Sonderfall RFID: auch Schreiben möglich</i>)
	Sensordaten	Distanzwerte, Geschwindigkeit, Gewicht etc.
	Kollisionsvermeidung	Aggregierte Informationsart, Sammlung sicherheitsrelevanter Daten
	Status-/Fehlermeldungen	Frei, Beschäftigt, Fehler, Fehlerart, Batteriezustand
	Schaltaufträge	Schaltaufträge als Eingang für SPS, Not-Aus-Signal

³⁴ Der Informationsaustausch mittels Abonnements wird in Abschnitt 5.3.1 näher erläutert.

Informationen, die im Zusammenhang mit Transportaufträgen ausgetauscht werden, können sehr komplex aufgebaut sein. So kann ein Transportauftrag neben Start- und Zielpunkt eine Reihe weiterer Attribute enthalten [Lib-2011, S. 78]. Beispielsweise kann einem Transportauftrag als Attribut eine Sequenzinformation beigefügt werden, um eine Sequenzierung von ungeordnet eintreffenden Transporteinheiten zu erreichen. Diese Information kann folgende Logik enthalten: *Übergabe der Transporteinheit X am Zielpunkt nur, wenn Transporteinheit Y diesen bereits passiert hat.*

Tabelle 4-3 enthält keine Aussage über Quellen und Zielpunkte der einzelnen Informationen. Sender und Empfänger der Nachrichten sind i.d.R. Softwareagenten, die Module, Transporteinheiten oder Dienste repräsentieren (vgl. Abschnitt 2.2.3). Der kommunikative Mehraufwand in einem derart dezentral gesteuerten System gegenüber hierarchisch gesteuerten Systemen soll am Beispiel der Lastwechselkoordination erfolgen. Diese erfolgt bei herkömmlichen Steuerungssystemen durch einen Leitreechner, der anhand der von ihm zentral gesammelten Daten prüft, ob sich die beiden beteiligten Fördertechnikelemente in einem sicheren Zustand für den Lastwechsel befinden. Ist dies der Fall, sendet er anschließend entsprechende Schaltbefehle an die Steuerungen der Fördertechnikelemente. In einem selbststeuernden Materialflusssystem müssen sich die am Lastwechsel beteiligten Fördertechnikmodule hingegen erst gegenseitig identifizieren (z.B. über einen Directory Facilitator [JADE]), ehe sie den Lastwechsel dezentral mittels Nachrichtenaustausch koordinieren können.

4.3.2 Klassifizierung relevanter Informationsarten

Aufgrund der Informationsvielfalt in selbststeuernden Materialflusssystemen und der teils sehr unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Informationsarten kann es sinnvoll sein, für unterschiedliche Datenklassen verschiedene Übertragungswege vorzusehen. Für Kommunikationssysteme in vergleichbaren Anwendungsdomänen wird dieser Ansatz bereits umgesetzt (vgl. Car-to-X-Kommunikation, Abschnitt 3.3). Eine Untersuchung und Gruppierung der im vorangegangenen Abschnitt bestimmten Informationsarten nach den vier Kriterien *Zeitvorgaben*, *maximale Datenmenge*, *durchschnittliche Bedarfshäufigkeit* und *Anzahl der Endpunkte*³⁵ (Nachrichtemp-

³⁵ Sender (Informationsquelle) und Empfänger (Zielpunkt) stellen die *Endpunkte* des Informationsaustausches dar und werden im Folgenden zusammengefasst betrachtet. Sender und Empfänger können zueinander in 1:1-, 1:n- oder n:1-Beziehung stehen.

fänger/-sender) unterstützt die Bedarfsermittlung für getrennte Kommunikationskanäle innerhalb des Kommunikationssystems (Abbildung 4-6). Angestrebt wird eine möglichst geringe Anzahl an Kanälen, um eine effiziente Nutzung des Übertragungsmediums und einen geringen Koordinationsaufwand zu gewährleisten.

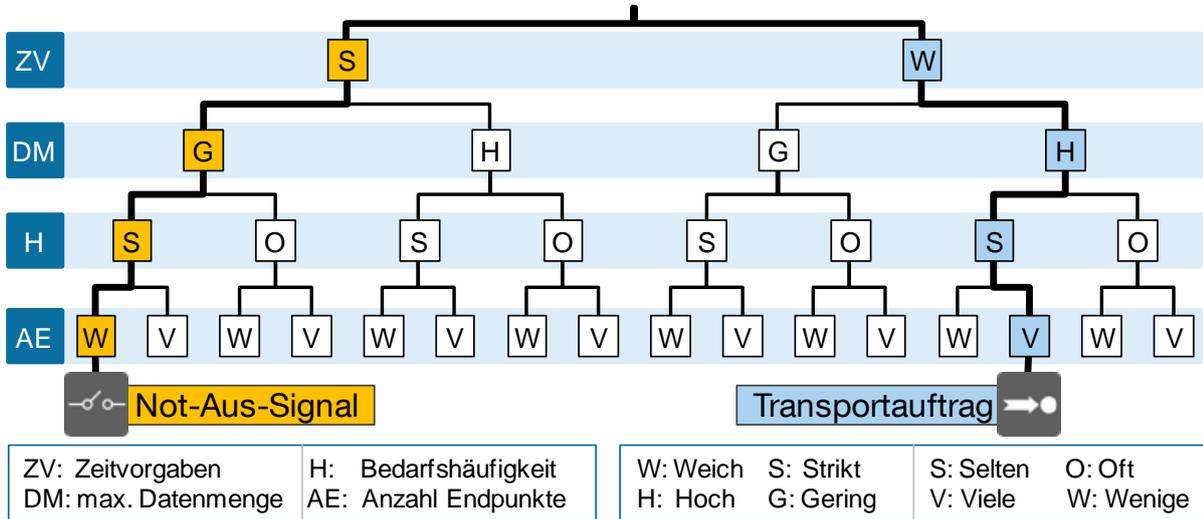


Abbildung 4-6: Entscheidungsbaum zur strukturierten Klassifizierung von Informationen mit beispielhafter Einordnung der Informationen *Transportauftrag* und *Not-Aus-Signal*

In Abbildung 4-6 ist beispielhaft die Einordnung der Informationen *Transportauftrag* und *Not-Aus-Signal* (Ausprägung der Informationsart *Schaltaufträge*) eingetragen. Der *Transportauftrag* weist weiche Zeitvorgaben auf, d.h. dass ein Nichteinhalten vorgegebener Fristen für die Übermittlung der Information kein Sicherheitsrisiko darstellt und lediglich zu Verzögerungen im Prozessablauf führen kann (vgl. Abschnitt 5.1.2). Das *Not-Aus-Signal* weist an dieser Stelle harte Zeitvorgaben auf. Es ist daher zu garantieren, dass diese Information ihren Zielpunkt innerhalb einer definierten Zeitspanne (z.B. 50 ms) erreicht. Die maximale Datenmenge, die mit einem *Transportauftrag* verbunden ist, ist im Vergleich zu einem *Not-Aus-Signal*, für das wenige Bit ausreichen, als sehr hoch einzustufen. Die Bedarfshäufigkeit ist bei beiden Informationen gering, da *Transportaufträge* und *Not-Aus-Signale* nicht kontinuierlich in kurzen Zeitabständen übertragen werden (anders als beispielsweise Visualisierungs- oder Sensordaten). Bezüglich der Anzahl der Endpunkte unterscheiden sich beide Informationstypen wiederum. Während *Auftragsdaten* potenziell für sämtliche Modul-Agenten der Fahrzeuge relevant sind und daher beispielsweise in einem Broadcast versendet werden, gilt das *Not-Aus-Signal* i.d.R. nur für ein Fahrzeug (Ausnah-

me: System-Not-Aus) und muss daher lediglich über einen direkten Nachrichtenaustausch an dieses übermittelt werden.

Anhand dieses Beispiels lässt sich erkennen, dass in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv Informationen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften ausgetauscht werden müssen. Um die Ableitung weiterer Handlungsschritte zu strukturieren, wird im Folgenden untersucht, ob sich Informationsarten zu Klassen mit vergleichbaren Anforderungen an ein Kommunikationssystem zusammenfassen lassen. Für diese Klassifizierung sind v.a. vorhandene Zeitvorgaben und die maximal zu übertragende Datenmenge entscheidend, da sie die Anforderungen an die technische Leistungsfähigkeit (Datendurchsatz, Zuverlässigkeit) des Kommunikationssystems bestimmen (Abschnitt 5.2). Abbildung 4-7 zeigt eine Einordnung der in Tabelle 4-3 aufgeführten Informationsarten nach diesen beiden Kriterien.

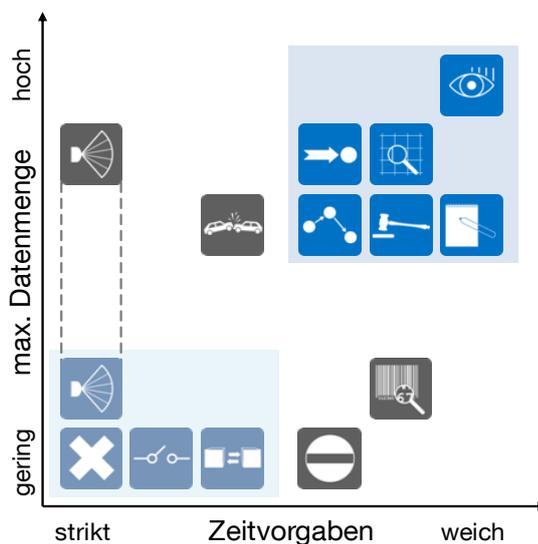


Abbildung 4-7: Einordnung verschiedener Informationsarten nach Datenmenge und Zeitvorgaben

Aus der Abbildung lassen sich zwei Anforderungsschwerpunkte ableiten. Einerseits muss das Kommunikationssystem in der Lage sein, Informationen mit geringer Datenmenge zuverlässig innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters zu übermitteln (Schaltaufträge, Status-/Fehlermeldungen, einfache Sensordaten³⁶, Lastwechselko-

³⁶ Im Rahmen einer Sensorfusion, wie sie in Abschnitt 4.1 angedacht wird, müssen Sensordaten ausgetauscht werden. Diese Daten können in Abhängigkeit von den genutzten Sensoren sehr umfangreich und komplex werden (z.B. 2D-Laserscanner). Dieser Fall ist von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Vielmehr wird empfohlen, im Falle einer Sensorfusion auf Basis von Laserscannern einen eigenen Funkkanal für die entsprechenden Sensordaten einzurichten.

ordination). Auf der anderen Seite stehen Informationen, die lediglich weichen Zeitvorgaben folgen müssen, jedoch sehr hohe Datenmengen und komplexe Strukturen aufweisen können (Topologie-/Layoutdaten, Transportauftragsdaten, Fahrauftragsdaten, Auftragsverhandlungen, Organisations-/Koordinationsdaten, Visualisierungsdaten). Diese beiden Anforderungsschwerpunkte gilt es bei der Entwicklung des technischen Kommunikationskonzepts zu adressieren.

Die weiteren Kriterien *Bedarfshäufigkeit* und *Anzahl der Endpunkte* werden im Folgenden ergänzend zur Ausgestaltung des logischen Kommunikationskonzepts herangezogen (Abschnitt 5.3). So kann es sinnvoll sein, dass der Austausch häufig anfallender Nachrichten mit vielen Empfängern oder Sendern (z.B. Visualisierungsdaten, Transportaufträge) einer anderen Logik folgt als der einmalige Austausch von Nachrichten zwischen einem Sender und Empfänger (z.B. Lastwechselkoordination). Im ersten Fall empfiehlt sich der indirekte Datenaustausch über ein Blackboardsystem, während im zweiten Fall eine direkte Nachrichtenübertragung (Peer-to-Peer-Kommunikation) den geringsten Kommunikationsaufwand verursacht (vgl. Abschnitt 3.1).

4.3.3 Fazit

Für den Betrieb bzw. die Koordination eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs benötigen die Softwareagenten und Steuerungsprogramme der autonomen Flurförderzeuge verschiedene Informationsarten, die nicht auf den Fahrzeugen selbst durch Sensoren generiert werden können (z.B. Layoutdaten). Diese Informationen müssen den Fahrzeugen über ein Kommunikationssystem bereitgestellt werden. Das Kommunikationssystem muss den Fahrzeugen bzw. den steuernden Softwareagenten zudem das Versenden von Statusmeldungen und koordinierenden Nachrichten (z.B. Auftragsverhandlungen, Lastwechselkoordination) ermöglichen. Die Informationsarten liegen nun in einer hinsichtlich ihrer Charakteristika (z.B. Datenmenge, Sicherheitsrelevanz) klassifizierten Form vor. Auf Basis dieser Analyse und Klassifizierung erfolgt die Entwicklung eines technischen (Abschnitt 5.2) sowie eines logischen Konzepts (Abschnitt 5.3) für ein auf den Bedarf selbststeuernder Fahrzeugkollektive in der Intralogistik zugeschnittenes Kommunikationssystem.

4.4 Referenzszenarien

Die Veranschaulichung des vorgestellten Internet der Dinge in der Intralogistik soll anhand zweier Referenzszenarien erfolgen. Beim ersten Szenario handelt es sich um eine Elektrohängebahnanlage, deren Fahrzeuge (EHB-Katzen), Weichen und Krane als eigenständige Module mit eigener Steuerungsintelligenz ausgelegt sind (Abschnitt 4.4.1). Das zweite Szenario zielt auf potenzielle Einsatzmöglichkeiten selbststeuernder Fahrzeugkollektive ab. Betrachtet werden typische logistische Prozesse in einem Distributionszentrum, welche stellvertretend für Logistikprozesse in weiteren intralogistischen Systemen betrachtet werden können (Abschnitt 4.4.2). Beide Szenarien liefern Ansatzpunkte und eine Untersuchungsgrundlage für das Kommunikationskonzept, welches den Gegenstand dieser Arbeit darstellt.

4.4.1 Elektrohängebahnanlage

Die bereits in Abschnitt 2.2.5 vorgestellte Versuchsanlage einer agentengesteuerten Elektrohängebahnanlage am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (**fml**) der Technischen Universität München kann für Tests eines Kommunikationskonzepts für selbststeuernde Fahrzeugkollektive genutzt werden. Zum einen gleicht die dezentrale Steuerungsorganisation des EHB-Systems der angestrebten Selbststeuerung mobiler Transportroboter. Zudem lassen sich die Einträgerkatzen der Elektrohängebahn als spurgeführte Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF, vgl. Abschnitt 2.1.2) interpretieren, wodurch sich Erkenntnisse aus dem EHB-System auch auf Fahrerlose Transportsysteme (FTS) und somit auch eingeschränkt auf selbststeuernde Fahrzeugkollektive übertragen lassen.

Die Elektrohängebahnanlage besteht aus einer Ringbahn mit drei Weichen, einem Einträgerkran und zwei EHB-Katzen (Abbildung 4-8). Die EHB-Katzen können sich im Bereich der Gleisanlage frei bewegen und mittels eines speziellen Lastaufnahmemittels in Form einer Greifeinrichtung genormte Kleinladungsträger (VDA-Behälter) mit einem Gewicht von bis zu 50 kg automatisch oder manuell aufnehmen und absetzen. EHB-Katzen, Weichen und Kran werden, dem Internet-der-Dinge-Paradigma folgend, als mechatronische Einheiten betrachtet und als solche mit Recheneinheiten und eigener Logik ausgestattet. Beide EHB-Katzen und der Einträgerkran verfügen über je einen Embedded-PC, auf dem deren Steuerungslogik in Form von Softwareagenten und SPS-Programmen hinterlegt ist, während die Mo-

dul-Agenten und Steuerungsprogramme der drei Weichen aus Kostengründen auf einem einzigen Embedded-PC zusammengeführt sind.



Abbildung 4-8: Elektrohängebahnanlage und Kranfeld in der Versuchshalle am Lehrstuhl fml

Die Softwareagenten sind als JADE/LEAP-Agenten ausgeführt [Bel-2007; JADE], die Steuerungsprogramme in Programmiersprachen nach IEC-61131-3 [IEC 61131-3] (vgl. Abschnitt 2.2.3). Jede EHB-Katze verfügt über einen Laser-Distanzmesser (Kollisionsvermeidung), eine WLAN-Anbindung (Agentenkommunikation), ein RFID-Lesegerät (Auslesen von Transponder-Wegmarken) sowie ein Absolut-Wegmesssystem auf Basis einer Codeschiene. Eine Middleware ermöglicht den notwendigen Datenaustausch zwischen Softwareagenten (strategische Steuerung) und den SPS-Programmen (operative Steuerung). Die operative Steuerungsschicht kann emuliert werden, um die Funktionalitäten der Agenten-Software ohne Rückwirkungen auf die mechanischen und elektrischen Komponenten der EHB-Anlage testen zu können [Chi-2010]. Zudem ermöglicht die Emulation eine Ergänzung des vorhandenen Streckennetzes um virtuelle Gleise, Weichen und Krane (Abbildung 4-9). Auf diese Weise können geplante Erweiterungen des Anlagenlayouts vorab getestet werden.

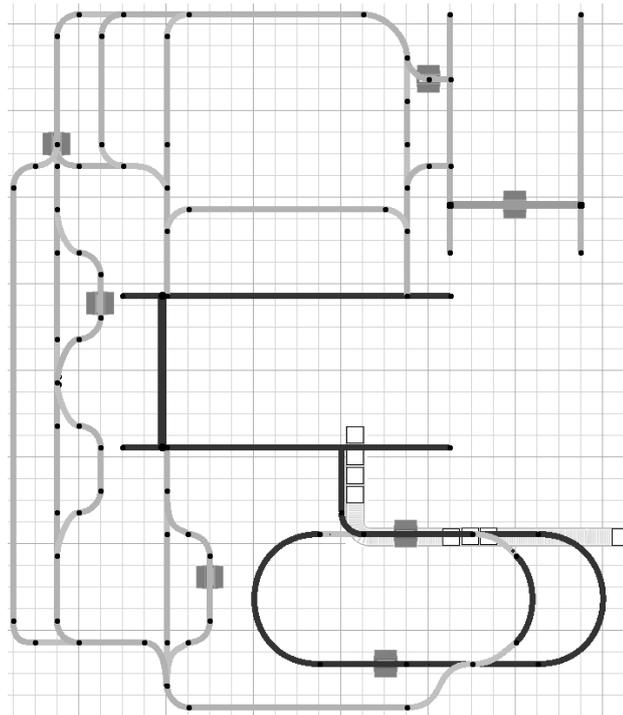


Abbildung 4-9: Mischbetrieb eines realen Elektrohängebahnsystems (schwarz) und einer simulierten Anlagenerweiterung (hellgrau) in der Betriebsphase unter Verwendung eines agentenbasierten Emulationsbaukastens [Gün-2010, S. 165]

Dieser Ansatz liegt der Validierung der Agentenkommunikation im Rahmen dieser Arbeit zugrunde (vgl. Abschnitt 6.1). Mit Hilfe der EHB-Emulation wird die Logik des entwickelten Kommunikationskonzepts für selbststeuernde Fahrzeugkollektive untersucht.

4.4.2 Logistikprozesse eines Distributionszentrums

Als zweites Referenzszenario dienen die logistischen Prozesse innerhalb eines Distributionszentrums³⁷ (auch *Warenverteilzentrum*, *Distributionslager*). In diesem Szenario treten typischerweise verschiedene logistische Funktionen (Fördern, Verteilen/Zusammenführen, Sequenzieren, Kommissionieren, Verpacken, Prüfen) parallel auf. Daher ist das Einsatzszenario *Distributionszentrum* für eine Analyse der Einsatzmöglichkeiten eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs sehr gut geeignet. Zudem sind die Prozesse in Distributionszentren im besonderen Maße von einem zu Beginn dieser Arbeit beschriebenen Anstieg an Komplexität und Dynamik in Logis-

³⁷Abgrenzung des Begriffs *Distributionszentrum* nach [LOG-2012]: „Ort, an dem Ware *gelagert* und *umgeschlagen* sowie i.d.R. *kunden- bzw. auftragsspezifisch* zusammengestellt wird. Der Schwerpunkt der Distributionszentren liegt auf makrologistischen Funktionen, insbesondere dem *Zeitausgleich* [...]“

tiknetzwerken betroffen, da sie als Konsolidierungs- und Verteilknoten innerhalb der Wertschöpfungskette von entscheidender Bedeutung für die logistische Leistungsfähigkeit des gesamten Netzwerks sind [Pfo-2010, S. 88].

Als Bereiche innerhalb eines Distributionszentrums werden üblicherweise *Wareneingang*, verschiedene *Lagerbereiche* (z.B. Bodenblocklager/Hochregallager für Paletten, Automatisches Kleinteilelager (AKL)), *Kommissionierzone*, *Verpackung* sowie *Warenausgang* unterschieden [Bow-1996]. Bei der Nutzung des Systems *Distributionszentrum* als Einsatzszenario für ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv liegt der Fokus auf der auftragsorientierten Versorgung der Kommissionierzone mit Gütern nach dem Bereitstellprinzip Ware-zum-Mann (WzM). Dem Kommissionierer werden bei diesem Bereitstellprinzip die Artikel, die er zur Zusammenstellung von Lieferaufträgen benötigt, aus einem AKL und/oder einem automatischen Paletten-Hochregallager über automatisierte Fördertechnik an seinem Kommissionierplatz bereitgestellt.

Dieser Anwendungsfall ist mit hohen Anforderungen an die eingesetzte Fördertechnik hinsichtlich Leistung und Zuverlässigkeit verbunden, da Geschwindigkeit und Qualität der Kommissionierung den Liefergrad³⁸ entscheidend beeinflussen. Diesen Anforderungen muss ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv genügen. Leert der Kommissionierer eine Bereitstellereinheit nicht vollständig, so wird diese i.d.R. als sogenannte Anbrucheinheit wieder in den Lagerbereich transportiert und eingelagert³⁹. Geleerte Behälter oder Paletten müssen aus dem Kommissionierkreislauf ausgeschleust und in einen Leerbehälter/-paletten-Speicher transportiert werden. Sämtliche dieser Transportvorgänge lassen sich durch ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv umsetzen. Aus diesem Szenario lassen sich prozessbedingte Anforderungen an das Kommunikationskonzept ableiten, die auf andere Anwendungsfälle der Intralogistik (z.B. Produktionsversorgung, Cross-Docking) übertragbar sind (Abschnitt 5.1.1).

³⁸ *Liefergrad* (auch *Lieferbereitschaftsgrad*) – Quotient aus *Anzahl zeit- und sachgerechter Auslieferungen* und *Anzahl Bestellungen* [Hom-2011, S. 182]

³⁹ Ausnahme: *Negativ-Kommissionierung* [Hom-2011, S. 207]

4.5 Zusammenfassung

Selbststeuernde Fahrzeugkollektive setzen sich aus einheitlich aufgebauten autonomen mobilen Transportrobotern zusammen, welche eigenständig logistische Funktionen erfüllen können. Durch Kooperation und Koordination der Einzelfahrzeuge entsteht ein emergentes Kollektivverhalten, das selbststeuernde Fahrzeugkollektive auszeichnet und die Umsetzung komplexer logistischer Funktionen ermöglicht. Grundlage für die Steuerung einzelner Fahrzeuge und die Organisation des Gesamtsystems ist neben Algorithmen und Mechanismen zur Auftragsdisposition, zur Koordination mehrerer Einheiten und zur effizienten, kollisionsfreien Navigation ein auf die spezifischen Anforderungen des Fahrzeugkollektivs zugeschnittenes Kommunikationssystem, das den notwendigen Informationsaustausch zwischen den Akteuren sicherstellt.

Die durchgeführte Datenanalyse und -klassifizierung grenzt die benötigten Informationen ein und ordnet diese nach für den Datenaustausch relevanten Kriterien. Die definierten Referenzszenarien *Agentengesteuerte EHB-Anlage* und *Logistikprozesse eines Distributionszentrums* stellen einen Bezug zu realen Einsatzfeldern dar und dienen im Folgenden der Ableitung prozessbedingter Anforderungen an das Kommunikationssystem sowie der Validierung der erarbeiteten Konzepte. Auf diesen Grundlagen aufbauend stellt der folgende Abschnitt ein Kommunikationskonzept für autonome mobile Fördertechnikmodule in selbststeuernden Fahrzeugkollektiven der Intralogistik vor.

5 Kommunikationskonzept für autonome mobile Fördertechnikmodule

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Konzeption eines geeigneten Kommunikationssystems für den Datenaustausch in verteilt gesteuerten und auf autonomen Flurförderzeugen basierenden Materialflusssystemen. In Kapitel 4 wird die Funktionsweise und der Aufbau derartiger selbststeuernder Fahrzeugkollektive charakterisiert. Als Grundlage für die Konzeptentwicklung werden dort Informationsarten bestimmt, deren Austausch für die selbstständige Steuerung der Einzelfahrzeuge sowie für deren Koordination untereinander erforderlich ist, und zwei Szenarien definiert, die für den weiteren Gang der Untersuchung als Referenzen für das Einsatzfeld selbststeuernder Fahrzeugkollektive dienen.

Zu Beginn dieses Kapitels werden zunächst Anforderungen, denen das Kommunikationskonzept genügen muss, gesammelt und analysiert (Abschnitt 5.1). Daran schließt sich die Vorstellung des aus Informationsbedarf und Anforderungen abgeleiteten Konzepts in seiner technischen (Abschnitt 5.2) und logischen Ausprägung (Abschnitt 5.3) an. Aus der Zusammenführung von technischem und logischem Konzept ergibt sich ein Gesamtkonzept für die Kommunikation in selbststeuernden Fahrzeugkollektiven der Intralogistik (Abschnitt 5.4). Abschließend werden die Ergebnisse und Erkenntnisse dieses Kapitels zusammengefasst (Abschnitt 5.5).

5.1 Anforderungsanalyse

Zunächst werden Anforderungen ermittelt, welche unabhängig von der konkreten Realisierungsform für relevante intralogistische Prozesse (vgl. Abschnitt 4.2) gelten. Diese Anforderungen definieren den Rahmen für den Betrieb selbststeuernder Fahrzeugkollektive und bestimmen somit den spezifischen Informationsbedarf. Die prozessbedingten Anforderungen bedingen ihrerseits Anforderungen an das technische und an das logische Kommunikationskonzept. Die Anforderungen werden zunächst lösungsneutral formuliert. Der erforderliche Leistungsumfang des Kommunikationssystems wird festgelegt, jedoch ohne Vorgaben, auf welche Art und Weise die Leistungsmerkmale zu realisieren sind. Die Anforderungen sind auf eine Weise zu beschreiben, die eine objektive Überprüfung bezüglich deren Erfüllung ermöglicht

(Verifizierbarkeit). Durch die präzise Formulierung der Anforderungen entsteht ein Anforderungskatalog. Ein Anforderungskatalog zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus [Bol-98]:

- **Eindeutigkeit:**
Jede Anforderung ist auf eine einzige Art und Weise interpretierbar.
- **Vollständigkeit:**
Keine Anforderung wird als selbstverständlich vorausgesetzt.
- **Konsistenz:**
Es besteht kein Widerspruch zwischen einzelnen Anforderungen.
- **Modifizierbarkeit:**
Form und Struktur des Anforderungskatalogs erlauben Änderungen.
- **Nachvollziehbarkeit:**
Ursprung aller Anforderungen ist erkennbar.
- **Nutzbarkeit:**
Der Katalog ist für Systemwartung und Nachfolgeprojekte nutzbar.

Diese Eigenschaften werden bei der Generierung eines Anforderungskatalogs für Kommunikationssysteme selbststeuernder Fahrzeugkollektive berücksichtigt.

5.1.1 Prozessbedingte Anforderungen der Intralogistik

Basis für eine Bestimmung der Anforderungen an ein Kommunikationssystem ist zunächst eine Analyse der Prozesse, in denen es zum Einsatz kommen soll. Im vorliegenden Fall sind dies innerbetriebliche Logistikprozesse, die durch ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv abgebildet werden. Als konkretes Anwendungsbeispiel dienen die logistischen Prozesse innerhalb eines Distributionszentrums (vgl. Abschnitt 4.4.2). Eine Auflistung der Funktionen, die die Fahrzeuge in intralogistischen Prozessen übernehmen können, findet sich in Abschnitt 4.2. Mit den Prozessen verknüpft sind Anforderungen an Funktionsumfang und Gestalt der eingesetzten Fördertechnik sowie an deren Steuerungs- und Kommunikationstechnik. Die mechanische, elektrische und steuerungstechnische Gestaltung der eingesetzten Materialflusstechnik ist nicht Gegenstand dieser Arbeit und wird daher nur als zusätzlicher Einflussfaktor auf die Fahrzeugkommunikation betrachtet.

Die konkurrierenden Zielsetzungen in den Knotenpunkten eines logistischen Netzwerks sind ein hoher Liefergrad bei gleichzeitig niedrigen Bestandskosten [Gün-2010b; Pfo-2010]. Für innerbetriebliche Transporte, wie sie von einem Fahrzeugkollektiv durchgeführt werden, leitet sich daraus die Forderung nach einer hohen Termintreue, d.h. die vollständige und fehlerfreie Ausführung eines (Transport-)Auftrags innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters, ab. Der Liefergrad wird, wie oben erwähnt (Abschnitt 4.4.2), durch die sach- und zeitgerechte Auslieferung von Bestellungen bestimmt. Neben einer hohen Prozessqualität (z.B. in Form fehlerfreier Kommissionierung) ist daher der Faktor Zeit entscheidend. Schnelle Lieferzeiten lassen sich realisieren, wenn Waren und Güter direkt aus dem Bestand entnommen werden können. Lässt sich der Absatz einzelner Warengruppen nur ungenau prognostizieren, so führt dies dazu, dass große Mengen einzelner Positionen über lange Zeiträume eingelagert werden und auf diese Weise Kapital binden sowie die freien Lagerkapazitäten beschränken. Werden im Gegensatz dazu nur wenige Waren gelagert, so können bei einem starken Nachfrageanstieg Lieferengpässe entstehen, die einen reduzierten Lieferbereitschaftsgrad bedingen. Lange Durchlaufzeiten und ein zu geringer Systemdurchsatz verstärken diesen Effekt. Eine schnelle Auslieferung wird verhindert und Ressourcen im Materialflusssystem werden blockiert. Diese Problematik findet sich v.a. in starren und unzureichend dimensionierten Materialflusssystemen.

Eine wandelbare Gestaltung von Materialflusssystemen (vgl. Abschnitt 2.2.1) kann den genannten Zielkonflikt zwischen hohem Liefergrad und geringen Beständen entschärfen. Gefordert sind ein hohes Maß an Flexibilität (Layout-, Fördergut-, Durchsatz- und Prozessflexibilität) und eine kurzfristige Reaktionsfähigkeit (Integrationsfähigkeit, Erweiterbarkeit) sowie eine hohe Fördergeschwindigkeit. Diese Anforderungen gelten auch für selbststeuernde Fahrzeugkollektive, wenn diese eine Alternative zu herkömmlichen Materialflusssystemen darstellen und diese substituieren sollen.

Auf eine gute Erfüllung der Forderungen nach Durchsatz- und vor allem nach Layoutflexibilität weist die Definition für *Zellulare Transportsysteme* in Kapitel 4 hin, denen selbststeuernde Fahrzeugkollektive zuzuordnen sind. Auch die Forderung nach Integrationsfähigkeit und Erweiterbarkeit ist systemimmanent erfüllt, wenn das Fahrzeugkollektiv nach den Vorgaben dieser Definition gestaltet wird. Die Flexibilität eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs hinsichtlich der transportierbaren Fördergüter ist abhängig von der Gestaltung der Fahrzeuge (z.B. Traglast, Abmaße), von

deren Lastaufnahmemittel sowie von deren Fähigkeit, spezielle Transportaufgaben (z.B. Palettentransport) kooperativ im Verbund durchzuführen (vgl. [Hip-2009]).

Durchlaufzeiten und Durchsatz im Materialflusssystem sind direkt von der Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit der Steuerung und des Datenaustauschs abhängig. Zu spät eintreffende Nachrichten oder ineffiziente – d.h. nicht echtzeitfähige – Steuerungsalgorithmen führen zu Wartezeiten im Prozess und können Gefahrensituationen im Materialflusssystem bedingen. Die Gestaltung der Steuerungsalgorithmen ist, wie oben erwähnt, nicht Gegenstand dieser Arbeit⁴⁰. Der folgende Abschnitt fokussiert basierend auf dieser prozessbedingten Forderung nach einem schnellen und zuverlässigen Datenaustausch konkrete Anforderungen an ein Kommunikationssystem für selbststeuernde Fahrzeugkollektive.

5.1.2 Anforderungen an das Kommunikationssystem

Im Folgenden werden die ausgearbeiteten Anforderungen an das Kommunikationssystem aufgelistet und erste Lösungsansätze zur Erfüllung der jeweiligen Anforderung vorgestellt.

Anforderung A1: Bedarfsgerechte Bereitstellung benötigter Informationen

Eine bedarfsgerechte Bereitstellung der von den Kommunikationsteilnehmern benötigten Informationen zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Qualität ist die grundlegende Anforderung an das Kommunikationskonzept. Die Ergebnisse einer Analyse und Klassifizierung der in einem Materialflusssystem vorhandenen Daten hinsichtlich ihrer Relevanz für den Betrieb selbststeuernder Fahrzeugkollektive werden in Abschnitt 4.3 vorgestellt.

Anforderung A2: Vollständige Mobilität der Sende- und Empfangseinheiten

Da das angestrebte Kommunikationssystem u.a. freifahrende Transportroboter als Kommunikationspartner verbinden soll, muss sich dieser hohe Grad an Mobilität auch in den Knoten des Kommunikationsnetzwerks (Sende-/Empfangseinheiten) widerspiegeln. Diese Anforderung beeinflusst die Auswahl des Übertragungsmedi-

⁴⁰ Algorithmen zur Selbststeuerung intralogistischer Systeme stellen u.a. Liekenbrock [Lie-2009], Mayer [May-2009] und Libert [Lib-2011] in ihren Arbeiten vor.

ums und der Kommunikationstechnologie (vgl. Abschnitt 5.2.1). Drahtgebundene Lösungen sind für die Realisierung der Kommunikation unter den Fahrzeugen bzw. zwischen Fahrzeugen und peripheren Einrichtungen (z.B. Übergabestationen, übergeordneten Serversystemen) nicht geeignet. Die Anforderung nach mobilen Sendeeinheiten besteht auch häufig für Fahrerlose Transportsysteme (FTS) und wird in diesem verwandten Anwendungsgebiet mit drahtlosen Techniken erfüllt (vgl. Abschnitt 3.2).

Anforderung A3: Kommunikation in Echtzeit

Die Fähigkeit zur Selbststeuerung eines Kollektivs aus autonomen mobilen Transportrobotern setzt eine Verarbeitung prozessrelevanter Daten in *Echtzeit*, d.h. „*schritthaltend mit dem angeschlossenen technischen Prozess*“ [Hom-2011, S. 75], voraus, da sich das System ansonsten ineffizient oder sogar sicherheitsgefährdend verhält. Daher muss auch das Kommunikationssystem die Reaktion des Systems auf äußere Ereignisse in vorbestimmbaren Zeiten (*Echtzeitfähigkeit*) unterstützen, indem es Informationen stets rechtzeitig zur Verfügung stellt. Verzögerungen im logistischen Prozess aufgrund zu spät eintreffender Nachrichten sind auszuschließen.

Es gilt zu beachten, dass eine Aufrechterhaltung der Echtzeitfähigkeit nicht ausschließlich vom Zeitbedarf für die Datenübertragung abhängt, sondern ebenso von der Geschwindigkeit der Datenverarbeitung und möglichen Wartezeiten beim Empfänger. Eine langsame (z.B. aufgrund zu geringer Rechenleistung oder ineffizienter Verarbeitungsalgorithmen) oder verspätete Verarbeitung der Daten kann dazu führen, dass das Zielsystem trotz rechtzeitiger Übermittlung der Information über das Kommunikationssystem nicht rechtzeitig reagiert. Die Eignung einer Kommunikationstechnik für eine bestimmte Aufgabe (auch: *Anwendungsklasse*, vgl. Tabelle 5-1) kann anhand charakteristischer Kenngrößen wie Latenzzeiten oder Deterministik der Datenübertragung ermittelt werden.

Abhängig davon, welche Konsequenzen eine Verletzung der Echtzeitvorgaben möglichenfalls nach sich zieht, wird zwischen harten und weichen Echtzeitanforderungen unterschieden. Während bei *harten Echtzeitanforderungen* ein Überschreiten der definierten Zeitvorgaben zu einem kritischen Systemverhalten führen kann und daher unter keinen Umständen tolerierbar ist (z.B. fehlerhafte elektronische Motorsteuerung), äußern sich bei Anwendungen mit *weichen Echtzeitanforderungen* Fristver-

letzungen lediglich in störenden Effekten (z.B. stockendes Bildsignal eines Video-konferenzsystems).

Im vorliegenden Anwendungsfall eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs werden Regelkreise für Positioniervorgänge oder zur Kollisionsvermeidung, die harten Echtzeitanforderungen unterliegen, i.d.R. über Fahrzeug-interne, echtzeitfähige Bussysteme (z.B. zwischen Steuerung, Wegmesssystem und Antrieb) umgesetzt. Für den externen Datenaustausch unter den Fahrzeugen bzw. zwischen den Fahrzeugen und weiteren Kommunikationspartnern beispielsweise zu Auftrags- oder Statusinformationen gelten meist weiche Echtzeitanforderungen. Diese gilt es konsequent einzuhalten, da verspätete Datenpakete zu unnötigen Stillstandzeiten einzelner Fahrzeuge mit Informationsbedarf und somit zu Einschränkungen der Systemleistung führen können.

Detaillierte Klassifizierungen des Zeitverhaltens unterschiedlicher Anwendungen geben die International Society of Automation (ISA) (Tabelle 5-1, [ISA-2008]) sowie die *NAMUR⁴¹-Empfehlung 124* [NE 124] vor.

Tabelle 5-1: Anwendungsklassifizierung nach dem ISA-SP100 Komitee [ISA-2008]

	Klasse	Anwendung	Beschreibung (Anwendungsbeispiele)
Sicherheit	0	Notfallmaßnahmen	immer zeitkritisch (Notabschaltung)
	1	geschlossener Regelkreis	oft zeitkritisch (direkte Aktorsteuerung)
Prozesssteuerung	2	geschlossener Regelkreis	gewöhnlich unkritisch (niedrigerfrequenter Regelkreis)
	3	offener Regelkreis	human-in-the-loop (manuelle Pumpensteuerung)
Monitoring	4	Visualisierung	kurzfristige betriebliche Auswirkungen (Wartung, Internet über WLAN)
	5	Aufzeichnung	keine unmittelbaren Konsequenzen (Zustandsüberwachung)

Die *NAMUR-Empfehlung 124* [NE 124] beschreibt Mindestanforderungen für einen zuverlässigen und wirtschaftlichen Einsatz von drahtlosen Kommunikationstechnologien in der Prozesstechnik und gibt Hinweise und Empfehlungen für den Einsatz in der betrieblichen Praxis. Trotz der Fokussierung auf verfahrenstechnische Prozesse

⁴¹ NAMUR – Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie

stellt die Empfehlung eine geeignete Ausgangsbasis für die Anforderungsanalyse im Zusammenhang mit der Gestaltung eines Kommunikationssystems für ein Kollektiv aus selbststeuernden Flurförderzeugen dar. Die NAMUR führt drei Anwendungsklassen auf, in welche funkbasierte Technologien und Anwendungen der Automatisierungstechnik nach deren Einsatzbereich eingeordnet werden können. Diese drei Klassen sind [NE 124, S. 5]:

- Anwendungsklasse A – Funktionale Sicherheit (Safety):
zeitkritische Anwendungen; Prozesseingriffe und Wechselwirkungen mit anderen Applikationen und Systemen sicherheitskritisch
- Anwendungsklasse B – Prozessführung (Control):
zeitkritische, deterministische Anwendungen; Prozesseingriffe/Wechselwirkungen mit anderen Applikationen und Systemen möglich
- Anwendungsklasse C – Anzeige (Monitoring):
nicht zeitkritische Anwendungen (reine Zusatzinformationen); Wechselwirkungen mit anderen Applikationen und Systemen ausgeschlossen

Da die Fahrzeug-zu-Fahrzeug- bzw. Fahrzeug-zu-Peripherie-Kommunikation in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv i.d.R. keinen harten Echtzeitanforderungen unterworfen ist, wird diese Anforderungsausprägung bei der Konzeptentwicklung im Rahmen dieser Arbeit nur am Rande betrachtet. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Funktechnologien für Anwendungen der ISA-Klassen 2 bis 5 bzw. der NAMUR-Klassen B und C mit weichen Echtzeitanforderungen.

Anforderung A4: Wirtschaftlichkeit und Anbieterunabhängigkeit

Die Kosten der Kommunikationseinrichtung gehen direkt in die Gesamtkosten der Flurförderzeuge ein. Da ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv aus einer Vielzahl an Transportrobotern besteht, gilt es, die Kosten des Einzelfahrzeugs möglichst gering zu halten (Skaleneffekt). Diese Zielvorgabe gilt auch für einzelne Komponenten wie Sende- und Empfangseinheiten des Kommunikationssystems. Geräte und Systeme mit einer weiten Verbreitung und einem günstigen Preis-Leistungs-Verhältnis basieren meist auf internationalen Normen oder Standards. Proprietäre Lösungen oder Erweiterungen sind zu vermeiden, da diese von der Preisgestaltung und dem Service einzelner Anbieter abhängig sind.

Um die Interoperabilität und eine einfache Austauschbarkeit (Interchangeability) von Kommunikationskomponenten unterschiedlicher Hersteller zu gewährleisten, müssen diese nicht nur denselben Standard nutzen, sondern darüber hinaus hinsichtlich Anschlusstechnik (Steckverbindungen, Antennen), Energieversorgung (Versorgungsspannung, Batteriekapazität) und Security-Maßnahmen einheitlich gestaltet sein [NE 124]. Neben dem Anschaffungspreis gehen Wartungs-, Energie- und Entsorgungskosten in die Lebenszykluskosten des Kommunikationssystems ein und beeinflussen dessen Wirtschaftlichkeit. Diese Kostenfaktoren sind jedoch als vergleichsweise gering einzuschätzen und werden daher nicht näher betrachtet.

Anforderung A5: Nutzbarkeit im industriellen Umfeld

Der Einsatz elektronischer Komponenten in industriellen Anwendungen ist mit speziellen Rahmenbedingungen verbunden, da raue Umgebungsbedingungen wie Staub, Schmutz, Spritzwasser, Feuchtigkeit, Stöße, Vibrationen oder starke Temperaturschwankungen auftreten können. Auch Geräteeigenschaften wie elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) oder Explosionsschutz können erforderlich sein. Diese Faktoren sind bei der Auswahl bzw. Gestaltung der Kommunikationseinrichtungen in Abhängigkeit vom Einsatzfall zu berücksichtigen. Im Referenzszenario eines Distributionszentrums (Abschnitt 4.4) treten i.d.R. lediglich einfach beherrschbare Umgebungsbedingungen in Form von Staub, Stößen oder Vibrationen auf.

Drahtlosen Kommunikationstechniken stehen im Gegensatz zu drahtgebundenen Anwendungen die benötigten Ressourcen zur Signalübertragung nicht exklusiv zur Verfügung. Da internationale Funkstandards (z.B. WLAN, Bluetooth) in Produktionsstätten und Logistikzentren zunehmend Einsatz finden, steigen gleichzeitig die Anforderungen an deren Koexistenzfähigkeit. Die Koexistenz der eingesetzten Funktechnologien ist durch eine entsprechende Funkplanung zu gewährleisten (vgl. Abschnitt 5.2.1) [NE 124]. Darüber hinaus unterstützen Schnittstellen zur Systemintegration in vorhandene Bussysteme (z.B. PROFIBUS, Ethernet, vgl. Abschnitt 5.2.1) die Nutzbarkeit des Kommunikationssystems im industriellen Umfeld.

Anforderung A6: Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit

Die Forderung nach einer hohen Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit des Kommunikationssystems steht in engem Zusammenhang mit der Forderung nach einer Kommunikation in Echtzeit (Anforderung A3). Die zu erwartenden Eigenschaften von

Kommunikationstechnologien hinsichtlich dieser beiden Kriterien lassen sich aus Kennwerten (z.B. Paketverlustrate, Paketfehlerrate, Signalstärke) und der Deterministik des eingesetzten Medienzugriffsverfahrens (z.B. CSMA/CD, Token-Passing) folgern. Darüber hinaus kann auf Ergebnisse von Feldtests und Simulationen zurückgegriffen werden [NS2-2004; Tit-2005].

Während des Betriebs kann eine kontinuierliche Online-Überwachung der Kommunikationsinfrastruktur eine hohe Systemverfügbarkeit unterstützen, indem wesentliche Fehlerzustände frühzeitig erkannt und behoben werden. Spezielle Diagnose-Algorithmen generieren aus Fehlerzuständen aussagekräftige Statusmeldungen und ermöglichen eine Selbstüberwachung des Kommunikationssystems. Die *NAMUR-Empfehlung 124* [NE 124] nennt eine Reihe von Informationen, die der Selbstüberwachung in einem Kommunikationsnetzwerk dienlich sein können. Dazu gehören die Erkennung von Störungen und Zugriffen durch nicht zugelassene Teilnehmer, der Pegel des Funksignals, der Status der Energieversorgung, gemessene Latenzzeiten, die Netzwerkbelastung anhand der Häufigkeit von Kollisionen oder Verlusten der Datenpakete, kontinuierliche Lebenssignale (Alive-Signal) aller aktiven Netzwerkteilnehmer sowie die aktuellen topologischen Standorte der Funkteilnehmer.

Anforderung A7: Datensicherheit

Die Datensicherheit (Security) beim Austausch von Informationen ist eine weitere Anforderung an das Kommunikationssystem. Im Fall selbststeuernder Fahrzeugkollektive sind die ausgetauschten Daten zwar nicht vertraulich, ein missbräuchlicher Zugriff kann das Systemverhalten allerdings negativ beeinflussen und ist daher zu verhindern. Für offene Systeme (z.B. drahtlose Netzwerke) sind Security-Maßnahmen wie die Verschlüsselung der übertragenen Daten, Zugriffskontrollen (Authentifizierung, Autorisierung) und ggfs. eine sichere Ankopplung an übergeordnete Netzwerke vorzusehen [NE 124]. Entsprechende Sicherheitsmechanismen sind für gängige Kommunikationsstandards in unterschiedlicher Ausprägung spezifiziert und müssen bei der Gestaltung des Kommunikationssystems aus oben genannten Gründen Berücksichtigung finden.

Anforderung A8: Energieversorgung

Um das Kommunikationsnetz und damit die Fähigkeit zum Datenaustausch aufrecht zu erhalten, müssen die elektronischen Bauteile eines Kommunikationssystems während der Betriebszeit kontinuierlich mit ausreichender Energie versorgt werden. Die Energieversorgung für strombetriebene Komponenten auf den Flurförderzeugen ist mit zusätzlichen Herausforderungen verbunden, da aufgrund der hohen Mobilität der Fahrzeuge ein Anschluss an das Hallenstromnetz mit erheblichem Aufwand verbunden ist (z.B. Induktionsschleifen im Hallenboden). Stattdessen bietet sich die Stromversorgung per Batterie an. Autonome mobile Transportroboter führen i.d.R. Energiespeicher (z.B. Blei- oder Lithium-Ionen-Akkumulator) für Aktorik und Sensorik mit sich. Die Komponenten des Kommunikationssystems können an dieses bereits vorhandene Bordspannungsnetz angeschlossen werden.

Auf diese Weise ist keine separate Überwachung der Batterielebensdauer für die Kommunikationseinrichtung notwendig. Zudem entfallen zusätzliche Ladezyklen bzw. Aufwände für einen Batterieaustausch. Das benötigte Energiemanagement sowohl fahrzeugintern als auch für das Fahrzeugkollektiv als Materialflusssystem entspricht steuerungstechnischen Anforderungen und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Informationen zum Batterieladezustand der einzelnen Fahrzeuge stellen jedoch eine wichtige Informationsart dar und beeinflussen die Konzeptionierung des Kommunikationssystems (vgl. Tabelle 4-3).

5.1.3 Zusammenfassung der Anforderungen

Tabelle 5-2 fasst die Anforderungen an das Kommunikationssystem zusammen und listet die zugehörigen Lösungsansätze auf. Die Kürzel A1 bis A8 dienen der besseren Übersichtlichkeit, da in den folgenden Abschnitten an mehreren Stellen der Konzeptentwicklung Bezug auf die Anforderungen genommen wird.

Tabelle 5-2: Anforderungen an das Kommunikationssystem

	Anforderung	Lösungsansatz
A1	Bedarfsgerechte Bereitstellung benötigter Informationen	Analyse und Klassifizierung des Informationsbedarfs Entwicklung eines Kommunikationssystems
A2	Vollständige Mobilität der Sende- und Empfangseinheiten	Drahtlose Kommunikationstechnik
A3	Kommunikation in Echtzeit	Auslegung des Kommunikationssystems abhängig von relevanten Kenngrößen (z.B. Latenzzeit, Deterministik)
A4	Wirtschaftlichkeit und Anbieterunabhängigkeit	Interoperabilität/Austauschbarkeit (offene Standards, keine proprietären Lösungen)
A5	Nutzbarkeit in industriellem Umfeld	Gewährleistung der Koexistenz mit anderen Kommunikationssystemen (Funkplanung) robuste Komponenten
A6	Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit	Selbstüberwachung Berücksichtigung relevanter Kenngrößen (z.B. Signalstärke, Paketfehlerrate)
A7	Datensicherheit	Verschlüsselung und Zugriffskontrolle sichere Kopplung zu übergeordneten Netzwerken
A8	Energieversorgung	Energieversorgung über Fahrzeugbatterie

5.2 Technisches Kommunikationskonzept

Aufbauend auf den im vorangegangenen Abschnitt abgeleiteten Anforderungen sowie der in Abschnitt 4.3.2 durchgeführten Informationsklassifizierung erfolgt die Entwicklung eines technischen Kommunikationskonzepts. Dieses basiert auf Kommunikationstechnologien und -protokollen etablierter Kommunikationsstandards und auf ausgewählten Datenformaten. Ziel ist ein offenes, einfach nutzbares Kommunikationssystem, das auf Standardlösungen basiert und eine hohe Praxistauglichkeit aufweist. Gleichzeitig muss es den Austausch komplexer Informationen und großer Datenmengen, die zur Selbststeuerung eines intralogistischen Fahrzeugkollektivs benötigt werden, ermöglichen. Kriterien für die Güte eines Kommunikationssystems sind die Zuverlässigkeit, mit der die gesendeten Nachrichten fehlerfrei ihren Empfänger erreichen, und die Geschwindigkeit, mit der die Informationen zwischen

Informationsquelle und Zielpunkt übermittelt werden. Letztere ist abhängig von der Latenzzeit⁴² einer Verbindung.

5.2.1 Kommunikationsstandards

Aufbauend auf der Anforderungsanalyse aus Abschnitt 5.1 erfolgt die Auswahl geeigneter Kommunikationsstandards in weiteren zwei Schritten. Den ersten Schritt stellt eine Untersuchung verfügbarer Kommunikationsstandards dar. In einem zweiten Schritt werden ausgewählte Standards hinsichtlich ihrer Anforderungserfüllung bewertet. Die Forderung nach größtmöglicher Mobilität von Sende- und Empfangseinheiten (Anforderung A2) legt eine Fokussierung auf drahtlose Kommunikationstechnologien nahe. Drahtlose Technologien entfalten ihre Vorteile in Einsatzfeldern mit Anforderungen an Flexibilität und Mobilität und als Alternative zu kabelgebundenen Lösungen (z.B. Ersatz von Schleifkontakten oder Schleppkabeln) [NE 124].

Gängige Lösungen der industriellen Kommunikation wie Feldbussysteme (z.B. PROFIBUS, CAN) und Industrial Ethernet sind i.d.R. drahtgebunden ausgeführt [Sch-2006]. Dennoch sind auch diese Bussysteme Teil der Untersuchung, da sie als echtzeitfähige Systeme (Anforderung A3) designt sind und sich aus den verwendeten Kommunikationsprotokollen Erkenntnisse für das angestrebte Kommunikationskonzept ableiten lassen. So stellt der CAN-Bus (*Controller Area Network*) ein asynchrones⁴³ Feldbussystem dar, das aufgrund eines integrierten Mechanismus zur Vermeidung von Datenkollisionen (Zugriffsverfahren CSMA/CA⁴⁴) eine hohe Zuverlässigkeit aufweist und das Versenden wichtiger Nachrichten innerhalb einer berechenbaren Zeitspanne garantieren kann [Law-2009]. Das CAN-Bus-Protokoll lässt sich auf Funkstandards übertragen [PFT-2000].

Unter der Bezeichnung *Industrial Ethernet* werden Bestrebungen zusammengefasst, den Ethernet-Standard für den Datenaustausch in der industriellen Automatisierungstechnik nutzbar zu machen. Ethernet wird in der IEEE-Norm 802.3 (vgl. Tabelle 3-1 in Abschnitt 3.1) spezifiziert und ist die am weitesten verbreitete technische Um-

⁴² Die Latenzzeit setzt sich zusammen aus Ausbreitungs- und Übertragungsverzögerung sowie Wartezeiten bei einer Übertragung über mehrere Knotenpunkte.

⁴³ Im Gegensatz zur *synchronen Datenübertragung* ist bei der *asynchronen Datenübertragung* die Kommunikation nicht über ein Taktsignal synchronisiert, d.h. jeder Teilnehmer kann jederzeit Nachrichten versenden.

⁴⁴ CSMA/CA – *Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance*

setzung des drahtgebundenen Internets. Ethernet nutzt jedoch ein nicht-deterministisches Zugriffsverfahren (CSMA/CD⁴⁵) und kann daher das rechtzeitige Eintreffen zeitkritischer Nachrichten nicht garantieren. Daher sind für eine Verwendung des Ethernet-Standards als Feldbusprotokoll Anpassungen notwendig, um einen echtzeitfähigen Datenaustausch gewährleisten zu können [Kuz-2010, S. 42f]. Powerlink, PROFINet und EtherCAT sind Ausführungsbeispiele für Industrial-Ethernet-Lösungen, die eine echtzeitfähige Kommunikation in industriellen Anwendungen ermöglichen. Aufgrund des drahtgebundenen Charakters von Industrial Ethernet ist es in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv lediglich für die Vernetzung ortsfester Komponenten (z.B. ortsfeste Hardware-Plattformen der Softwareagenten, Access Points, Übergabestationen) geeignet.

Drahtlose Kommunikationstechnologien

Die in Abschnitt 5.1.2 formulierte Forderung nach vollständiger Mobilität der Sendeein- und Empfangseinheiten der Flurförderzeuge eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs (Anforderung A2) kann nur durch drahtlose Kommunikationstechniken erreicht werden. Induktive und optische Techniken zur drahtlosen Datenübertragung werden in Abschnitt 3.2 vor allem aufgrund der mit ihrem Einsatz verbundenen Einschränkungen hinsichtlich der Layoutflexibilität eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Daher konzentriert sich der weitere Gang der Untersuchung auf standardisierte Funktechniken. Im Hinblick auf die weiter oben formulierte Forderung nach einer wirtschaftlichen und anbieterunabhängigen Gestaltung des Kommunikationssystems (Anforderung A4) werden überwiegend lizenzfreie und nicht-proprietäre Funkstandards betrachtet. Abbildung 5-1 bietet einen Überblick über die lizenzfrei nutzbaren Frequenzen im elektromagnetischen Spektrum. Diese Frequenzbereiche werden als *ISM-Bänder* ⁴⁶ bezeichnet.

⁴⁵ CSMA/CD – *Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection*

⁴⁶ ISM – *Industrial, Scientific and Medical Band*

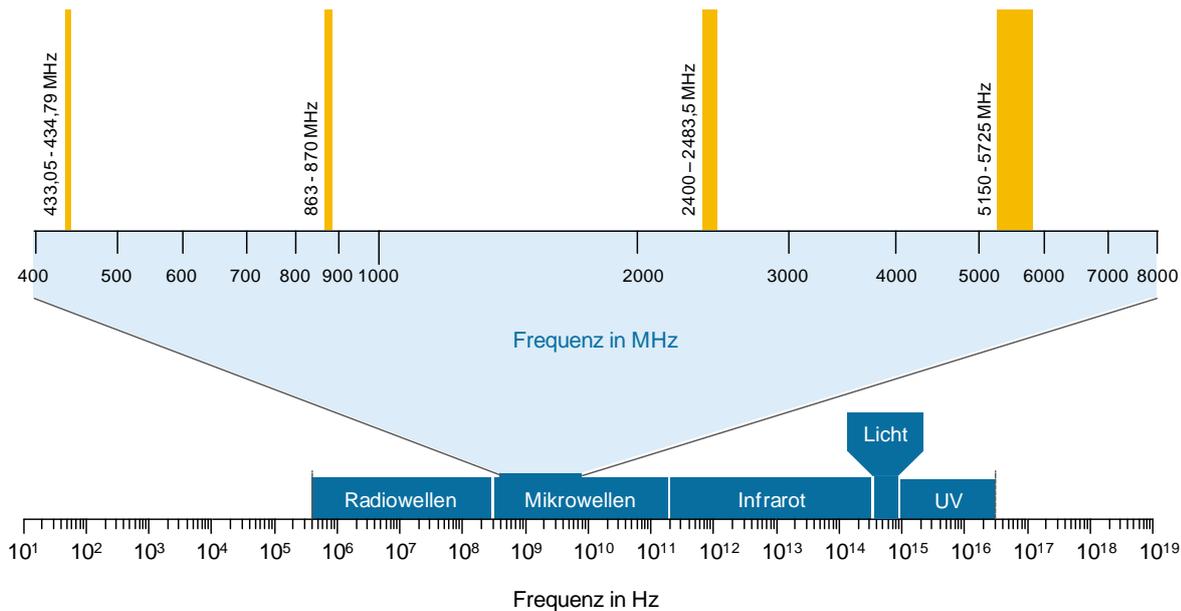


Abbildung 5-1: Lizenzfrei nutzbare Frequenzen im elektromagnetischen Spektrum [ZVEI-2008]

Ergänzend werden ausgewählte Funkstandards in lizenzierten Frequenzbereichen (z.B. Mobilfunkstandards) hinsichtlich ihrer Eigenschaften analysiert und mit den Standards der ISM-Bänder verglichen. Auf diese Weise entsteht eine umfassende und zielführende Ausgangsbasis für die Festlegung einzelner Funkstandards, die für eine Verwendung in selbststeuernden Fahrzeugkollektiven aufgrund ihrer technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften geeignet sind.

Bedeutung der Funkplanung

Ein vermehrter Einsatz von Funklösungen in industriellen Anwendungen sowie ein hoher Nutzungsgrad der lizenzierten ISM-Frequenzbereiche für offene Funkstandards wie WLAN erhöhen das Risiko einer gegenseitigen Beeinflussung bzw. Beeinträchtigung parallel betriebener Funksysteme. Eine Funkbeeinflussung tritt auf, wenn zwei oder mehrere Funksysteme

- zur gleichen Zeit
- auf derselben Frequenz und
- in gegenseitiger Funkreichweite

betrieben werden. Folgen der Funkbeeinflussung sind der Abbruch einzelner Funkverbindungen und somit der Verlust von Datenpaketen. Die damit einhergehende

verringerte Datenverfügbarkeit ist im Zusammenhang mit der Steuerung automatisierter Materialflusssysteme aus Gründen der Sicherheit und der Performanz nicht tolerierbar. Für die Nutzung eines auf Funktechnologien basierenden Kommunikationssystems für selbststeuernde Fahrzeugkollektive sind daher Methoden der *Funkplanung* von hoher Bedeutung. Die Funkplanung befasst sich mit der Auslegung und Koordination parallel betriebener Funknetzwerke, um deren gegenseitige Beeinflussung auszuschließen bzw. zu minimieren. Auf der Webseite des Zentralverbands Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) findet sich ein Leitfaden für den zuverlässigen Parallelbetrieb koexistierender Funklösungen [ZVEI-2008].

Auswahl geeigneter Funkstandards

Tabelle 5-3 fasst die Ergebnisse einer Recherche zu verfügbaren drahtlosen, funkbasierten Kommunikationstechniken zusammen. Als charakteristische Merkmale sind für jeden Funkstandard der genutzte Frequenzbereich, die Reichweite sowie die Datenübertragungsrate⁴⁷ angegeben. Die weiteren zur Charakterisierung und Bewertung der unterschiedlichen drahtlosen Kommunikationsstandards betrachteten Eigenschaften lassen sich in quantitative Faktoren (z.B. Latenzzeit, Paketfehlerrate) und qualitative Faktoren (z.B. Zuverlässigkeit, Datensicherheit, Verbreitung) einteilen.

Selbststeuernde Fahrzeugkollektive in der Intralogistik agieren i.d.R. räumlich begrenzt innerhalb von Logistik- und Produktionshallen. Daher reichen für den drahtlosen Datenaustausch Reichweiten von unter 50 m aus. Eine Abdeckung größerer Flächen kann durch parallele Funkzellen erreicht werden. Allerdings sind in diesem Fall Mechanismen für den nahtlosen Zellenwechsel (*Handover*) einzelner Fahrzeuge vorzusehen. Hohe Datenübertragungsraten unterstützen grundsätzlich eine Kommunikation in Echtzeit (Anforderung A3), da Datenpakete ihr Ziel theoretisch schneller erreichen. Allerdings kann ein nicht-deterministisches Zugriffsverfahren (z.B. CSMA/CD) und das damit verbundene Risiko von Datenkollisionen/-verlusten eine echtzeitfähige Kommunikation auch bei hohen Datenraten verhindern.

⁴⁷ Zu berücksichtigen ist, dass bei der *Datenübertragung* neben Nutzdaten auch Steuerdaten übertragen werden müssen. Der Durchsatz für Nutzdaten (*Datendurchsatz*) kann daher wesentlich geringer sein (z.B. WLAN: Übertragungsrate (brutto): 54 Mbit/s, Datendurchsatz (netto): 5-25 Mbit/s).

Tabelle 5-3: Überblick über drahtlose, funkbasierte Kommunikationstechniken (in Anlehnung an [Mat-2005], [Fin-2006], [Wil-2006] und [Krc-2010])

Kommunikations-technik		Frequenzbereich	Typische Reichweite	max. Datenübertragungsrate
RFID		125-134 kHz 13,56 MHz 400-930 MHz 2,5 & 5 GHz	< 6 m (passiv) < 120 m (aktiv)	1 kbit/s - 200 kbit/s
NFC		13,56 MHz	0 cm - 20 cm	106, 212, 424 kbit/s
802.11a	WLAN (Wi-Fi ⁴⁸)	5 GHz (ISM)	100 m	54 Mbit/s
802.11b/g		2,4 GHz (ISM)		
802.11n		2,4 GHz (ISM) 5 GHz (ISM)	300 m	600 Mbit/s
802.15.1	Bluetooth 1.1	2,4 GHz (ISM)	100 m (Klasse 1)	780 kbit/s
	Bluetooth 2.0		50 m (Klasse 2)	2,1 Mbit/s
	Bluetooth 3.0		10 m (Klasse 3)	24 Mbit/s
	WISA		10 m	1 Mbit/s
802.15.4	ZigBee	868 MHz (ISM) 2,4 GHz (ISM)	30 m (Indoor) 100 m (Outdoor)	20 kbit/s 250 kbit/s
	WirelessHART			
	ISA100.11a			
	6LoWPAN			
GSM		900 MHz 1,8 GHz 1,9 GHz	mehrere Kilometer	9,6 kbit/s
GPRS				115 kbit/s
EDGE				236 kbit/s
HSCSD				57,6 kbit/s
UMTS				7 Mbit/s
LTE				~100 Mbit/s
DECT				1,9 GHz
HIPERLAN/1		5 GHz (ISM)	50 m (Indoor)	23 Mbit/s
HIPERLAN/2				54 Mbit/s
HIPERLAN/3			5.000 m	23 Mbit/s
HIPERLAN/4			150 m	155 Mbit/s
Nanonet		2,4 GHz (ISM)	20 m	2 Mbit/s
SRD		868 MHz (ISM)	1.000 m	10 kbit/s
802.16	WiMAX	3,5 GHz	2 - 5 km	70 Mbit/s

⁴⁸ In dieser Arbeit werden die Begriffe *WLAN* und *Wi-Fi* synonym verwendet und auf ihre engere Bedeutung als lokale Funknetzwerke gemäß Protokollen der IEEE-802.11-Familie beschränkt.

Einige der aufgelisteten Funkstandards erweisen sich bei näherer Betrachtung als nicht für ein Kommunikationssystem für selbststeuernde Fahrzeugkollektive geeignet. Dem Ausschluss einzelner Funkstandards liegen folgende Gründe zugrunde:

- schlechte Erfüllung einzelner Kriterien (z.B. Reichweite, Unterstützung mobiler Teilnehmer) aufgrund einer Optimierung für andere Anwendungsfelder (RFID, NFC⁴⁹, SRD⁵⁰)
- geringer Entwicklungsstand zum Entscheidungszeitpunkt dieser Arbeit (WirelessHART, 6LoWPAN⁵¹, ISA100.11a)
- Nutzung lizenzbehafteter Frequenzbänder und damit verbundene Bestimmung wirtschaftlicher und technischer Leistungsmerkmale durch Dienstanbieter (Provider) (DECT⁵², WiMAX und Telekommunikationsstandards der zweiten bis vierten Generation (2G/3G/4G): GSM⁵³, HSCSD⁵⁴, GPRS⁵⁵, EDGE⁵⁶, UMTS⁵⁷, LTE⁵⁸)
- mangelnde Verbreitung (HIPERLAN⁵⁹/1-4)
- herstellerspezifische Sonderlösungen, die der Forderung nach einer nicht-proprietären Funktechnik entgegenstehen (WISA⁶⁰, Nanonet)

Geeignete Funkstandards

Als prinzipiell für die Nutzung in einem Kommunikationssystem für selbststeuernde Fahrzeugkollektive geeignet zu bewerten sind die Funkstandards ZigBee (IEEE

⁴⁹ NFC – *Near Field Communication*

⁵⁰ SRD – *Short Range Devices*

⁵¹ 6LoWPAN – *IPv6 over Low power WPAN*

⁵² DECT – *Digital European Cordless Telecommunications*

⁵³ GSM – *Global System for Mobile Communications (2G)*

⁵⁴ HSCSD – *High Speed Circuit Switched Data (2,5G)*

⁵⁵ GPRS – *General Packet Radio Service (2,5G)*

⁵⁶ EDGE – *Enhanced Data Rates for GSM Evolution (2,5G)*

⁵⁷ UMTS – *Universal Mobile Telecommunication System (3G)*

⁵⁸ LTE – *Long Term Evolution (4G)*

⁵⁹ HIPERLAN – *High Performance Radio Local Area Network*

⁶⁰ WISA – *Wireless Interface for Sensors and Actuators*

802.15.4), Bluetooth (IEEE 802.15.1) und WLAN/Wi-Fi (IEEE 802.11a/b/g/n). Die gewichtete Bewertung dieser drei Funkstandards hinsichtlich der Anforderungen an das angestrebte Kommunikationssystem enthält Tabelle 5-4.

Tabelle 5-4: Gewichtete Bewertung ausgewählter Funkstandards in Bezug auf die Anforderungen an das angestrebte Kommunikationssystem

	Gewicht	WLAN/Wi-Fi		Bluetooth		ZigBee	
A1	18%	3	0,54	2	0,36	1	0,18
A2	16%	3	0,48	2	0,32	3	0,48
A3	16%	1	0,16	1	0,16	1	0,16
A4	12%	3	0,36	3	0,36	2	0,24
A5	12%	1	0,12	2	0,24	2	0,24
A6	11%	2	0,22	2	0,22	2	0,22
A7	10%	3	0,30	3	0,30	3	0,30
A8	5%	1	0,05	2	0,10	3	0,15
Σ	100%	Σ	2,23	Σ	2,06	Σ	1,97

0 nicht erfüllt 1 bedingt erfüllt 2 gut erfüllt 3 sehr gut erfüllt

Anforderungen:

- | | |
|--|--|
| A1 – Bedarfsgerechte Bereitstellung benötigter Daten | A5 – Nutzbarkeit im industriellen Umfeld |
| A2 – Vollständige Mobilität für Sender/Empfänger | A6 – Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit |
| A3 – Kommunikation in Echtzeit | A7 – Datensicherheit |
| A4 – Wirtschaftlichkeit, Anbieterunabhängigkeit | A8 – Energieversorgung |

Die Bewertung basiert auf Rechercheergebnissen und Expertengesprächen⁶¹ und erfolgt anhand einer Skala mit den ganzzahligen Werten von 0 bis 3. Der höchste Wert bedeutet, dass die entsprechende Anforderung als *sehr gut erfüllt* bewertet wird. Der Wert 0 sagt aus, dass eine Anforderung *nicht erfüllt* wird. Da die Erfüllung der einzelnen Anforderungen – wie in Abschnitt 5.1 dargestellt – von unterschiedlicher Bedeutung für den Betrieb eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs ist, werden die Anforderungen mit verschiedenen Gewichtungen versehen. Generell stellen Anforderungen mit einer Gewichtung von über 15 Prozent *K.O.-Kriterien* dar, deren Nichterfüllung (Wert 0) zum Ausschluss des Standards führt. Die finale Bewertungszahl der einzelnen Standards liegt folglich ebenfalls zwischen den Werten 0 (*unge-*

⁶¹ Die Expertengespräche wurden im Rahmen des IGF-Projekts 16166 „Algorithmen und Kommunikationssysteme für die Zellulare Fördertechnik“ geführt [IGF 16166].

eigneter Standard) und 3 (*sehr gut geeigneter Standard*), wird allerdings mit zwei Nachkommastellen angegeben, um eine erweiterte Differenzierung der Ergebnisse zu erhalten.

Der WLAN-Standard IEEE 802.11 erreicht mit einer Bewertungszahl von 2,23 den besten Wert und erfüllt zwei der drei K.O.-Kriterien sehr gut. Daher ist eine WLAN-Lösung als am besten für den vorliegenden Einsatzfall geeignet anzusehen. Eine Nutzung von WLAN im 5-GHz-Band nach IEEE 802.11n kann die Bewertung hinsichtlich der Einsatzfähigkeit in einem industriellen Umfeld (Anforderung A5) zusätzlich verbessern, da in diesem Frequenzbereich aufgrund der aktuell geringen Verbreitung entsprechender Funklösungen mit einer geringeren Funkbeeinflussung durch andere Funknetze zu rechnen ist. Allerdings führt die geringe Etablierung zu erhöhten Komponentenkosten im Vergleich zu Komponenten für den 2,4-GHz-Frequenzbereich. Dieser Umstand wirkt sich hinsichtlich der Forderung nach Wirtschaftlichkeit (Anforderung A4) nachteilig aus, da die Kosten der Funkkomponenten direkt in die Gesamtkosten jedes autonomen Fahrzeugs eingehen. Für eine Nutzung von Funkstandards aus der IEEE-802.11-Familie sprechen aktuelle Erweiterungen, welche auch für einen Einsatz in selbststeuernden Fahrzeugkollektiven Relevanz aufweisen. So ist der Standard IEEE 802.11p für WLANs in Car-to-X-Netzwerken optimiert (vgl. Abschnitt 3.3). Die Erweiterung IEEE 802.11s ermöglicht die Einrichtung drahtloser, vermaschter Netzwerke, während mit der Erweiterung IEEE 802.11r eine Verkürzung des Handover-Vorgangs beim Wechsel zwischen Basisstationen auf 50 ms für eine verbesserte mobile Nutzbarkeit von Voice-over-IP-Diensten angestrebt wird. Zudem lässt sich WLAN ohne Systemsprung mit drahtgebundenen Ethernet-Lösungen koppeln [Wil-2006, S. 51].

An der Bewertungstabelle lässt sich ablesen, dass alle drei untersuchten Funkstandards die Forderung nach einer Kommunikation unter Echtzeitbedingungen (Anforderung A3) nur eingeschränkt erfüllen. Die Standards IEEE 802.11, IEEE 802.15.1 und IEEE 802.15.4 sind in ihrer Grundausrüstung nicht echtzeitfähig und daher lediglich für Anwendungen der ISA-Klassen 3 bis 5 (vgl. Abschnitt 5.1.2, Tabelle 5-1) verwendbar. Für die Anwendungsklassen 0, 1 und 2 existieren für die drahtlose Kommunikation derzeit lediglich proprietäre Lösungen bzw. Speziallösungen, welche bestehenden Standards um Echtzeit-Mechanismen erweitern. Allerdings sind hart echtzeitkritische Anwendungen auf den Fahrzeugen nicht von per Funk übermittelten Daten abhängig, sondern werden fahrzeugintern umgesetzt. Dennoch ließe sich die Flexibilität des Kommunikationssystems durch die Minderung vorhandener

Einschränkungen (z.B. beschränkte Echtzeitfähigkeit) erhöhen. Entsprechende Maßnahmen auf der Protokollebene stellen die Einführung von Alive-Signalen zur Überprüfung der Erreichbarkeit der Systemteilnehmer oder garantierte exklusive Zeitschlitze für den Nachrichtenversand einzelner Teilnehmer dar.

Da alle drei zur Auswahl stehenden Funktechnologien die lizenzfreien ISM-Frequenzbänder zur Datenübertragung nutzen, empfiehlt sich bei einer Verwendung weiterer Funklösungen in denselben Räumlichkeiten, wie oben erwähnt, die Durchführung einer Funkplanung, um die Koexistenzfähigkeit sämtlicher Kommunikationssysteme sicherzustellen [ZVEI-2008]. Eine Funkplanung berücksichtigt die durch andere Sender im gleichen Frequenzband belegten Kanäle, die Zeiträume und Intervalle, in denen andere Sender aktiv sind, sowie die räumliche Anordnung der weiteren Funknetze. In diesem Zusammenhang weist der Bluetooth-Standard eine Besonderheit auf. Zur Steigerung der Robustheit gegenüber Störungen durch parallel betriebene Funknetze wird ein Frequenzsprungverfahren (*Frequency Hopping*) verwendet, bei dem das genutzte Frequenzband (2,4-GHz-Band) in 79 verschiedenen Frequenzstufen eingeteilt ist, die fortlaufend gewechselt werden. Durch dieses Verfahren reduziert sich das Risiko von Kollisionen mit anderen Funkstandards, die das gleiche Frequenzband nutzen (z.B. WLAN).

ZigBee ist für einen energieeffizienten Betrieb und den Einsatz in drahtlosen Sensornetzen optimiert und weist im Vergleich zu WLAN und Bluetooth mit 250 kbit/s eine geringe Datenübertragungsrate auf. Mit einem sehr schnellen Verbindungsaufbau (≤ 30 ms) und der Fähigkeit zur Ad-hoc-Vernetzung und Selbstorganisation ist ZigBee jedoch gut für die mobilen Teilnehmer in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv geeignet. Voraussetzung ist allerdings ein vergleichsweise geringes auszutauschendes Datenvolumen oder ein kombinierter Einsatz mit einem leistungstärkeren Standard (z.B. WLAN, Bluetooth).

Es bleibt festzuhalten, dass keiner der etablierten offenen Funkstandards sämtliche Anforderungen (vgl. Abschnitt 5.1.3) eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs komplett erfüllt. Zu unterschiedlich sind die Anwendungsfälle, für die die bestehenden Standards optimiert sind. Dennoch bietet die Nutzung vorhandener Kommunikationsstandards erhebliche Vorteile gegenüber der Neuentwicklung einer Sonderlösung. Bei den benötigten Komponenten handelt es sich um Standardgeräte, die in großen Stückzahlen produziert werden und daher kostengünstig von unterschiedlichen Anbietern erhältlich sind. Darüber hinaus existieren zu etablierten Funkstan-

dards detaillierte und leicht zugängliche Spezifikations- und Dokumentationsunterlagen. Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit zeigen, dass die Standards WLAN, Bluetooth und ZigBee mit ihren jeweiligen charakteristischen Eigenschaften in der Lage sind, sämtliche in Abschnitt 5.1 formulierten Anforderungen zu unterstützen. Gerade WLAN und Bluetooth werden fortlaufend weiterentwickelt und in Hinsicht auf Datentransferraten, Sicherheit und Koexistenz mit anderen Funksystemen in jeder Version verbessert. Daher eignen sich diese Kommunikationstechniken für die Realisierung des Datenaustauschs in einem Verbund aus autonomen mobilen Transportrobotern.

5.2.2 Datenformate

In Abschnitt 4.3.2 werden zwei Gruppen von Informationen identifiziert, die sich vor allem in ihrem Zeitverhalten und ihrer Struktur unterscheiden. Die Informationsarten der ersten Gruppe weisen komplexe Strukturen auf (z.B. Transportauftrag, Streckenreservierung). Da die durch diese Informationen beeinflussten realen Prozesse üblicherweise im Sekundenbereich ablaufen, sind auch die Zeitanforderungen für deren Übertragung als weich einzustufen. Die entsprechenden Informationen müssen lediglich ihren Zielpunkt zu einem Zeitpunkt erreichen, der deren rechtzeitige Verarbeitung zulässt. Auch Nachrichten, die der Organisation und Koordination des Agentensystems dienen, gehören dieser Gruppe an.

Für die zweite Gruppe von Informationen sind sehr kurze Übertragungszeiten von entscheidender Bedeutung (z.B. Schaltauftrag, Kollisionsvermeidung). Jedoch weisen Nachrichten zur Übermittlung dieser Informationen i.d.R. eine geringe Komplexität auf. Für einen einfachen Schaltbefehl reichen beispielsweise der Name (ID) des zu schaltenden Steuerungseingangs sowie eine boolesche Variable (*TRUE/FALSE* bzw. *1/0*) aus. Es bietet sich daher für den Datenaustausch in einem selbststeuernenden Fahrzeugkollektiv die Nutzung zweier unterschiedlicher Datenformate an, die abhängig von diesen spezifischen Eigenschaften der zu übertragenden Informationen zum Einsatz kommen. Der folgende Abschnitt stellt mit den Datenformaten *Extensible Markup Language* (XML) und *Binärcodierung* zwei Möglichkeiten der Informationscodierung vor, mit welchen sich beide Informationsgruppen in Abhängigkeit ihrer spezifischen Eigenschaften effizient aufbereiten und übertragen lassen.

Extensible Markup Language (XML) und Binärcodierung

Für komplexe Datensätze bietet sich eine Codierung im Datenformat XML (*Extensible Markup Language*, [W3C-2008]) an. XML stellt Daten hierarchisch strukturiert in Form von Textdaten unter Angabe der logischen Bedeutung der einzelnen Informationen dar. XML-Dateien sind für einen plattformunabhängigen Datenaustausch zwischen verschiedenen Computersystemen anwendbar und aufgrund ihrer Struktur sowohl maschinen- als auch menschenlesbar. Das folgende Beispiel zeigt einen in XML codierten, von einem mobilen Transportroboter reservierten Transportauftrag:

```
<Auftrag>
  <DataName>ID_7</DataName>
  <Auftragsart>Transport</Auftragsart>
  <Einlasszeit>0</Einlasszeit>
  <Prioritaet>2</Prioritaet>
  <Start>
    <DataName>Start_ID_7</DataName>
    <Name>Übergabe_AKL_Gasse_1</Name>
    <PositionX_mm>15880</PositionX_mm>
    <PositionY_mm>1683</PositionY_mm>
    <Pose_grad>90</Pose_grad>
    <Zugriffsrichtung>links</Zugriffsrichtung>
    <Lastwechselart>Aufnahme</Lastwechselart>
    <Zugriffsart>Automatisch</Zugriffsart>
    <LastwechselHoehe_mm>790</LastwechselHoehe_mm>
  </Start>
  <Ziel>
    <DataName>Ziel_ID_7</DataName>
    <Name>Übergabe_Kommissionierstation_7</Name>
    <PositionX_mm>3911</PositionX_mm>
    <PositionY_mm>12811</PositionY_mm>
    <Pose_grad>45</Pose_grad>
    <Zugriffsrichtung>rechts</Zugriffsrichtung>
    <Lastwechselart>Abgabe</Lastwechselart>
    <Zugriffsart>Automatisch</Zugriffsart>
    <LastwechselHoehe_mm>790</LastwechselHoehe_mm>
  </Ziel>
  <Erledigt>FALSE</Erledigt>
  <Reserviert>Transportroboter_1</Reserviert>
</Auftrag>
```

Das Beispiel verdeutlicht die Baumstruktur eines XML-Datensatzes. Mittels spezieller Parser lassen sich die in XML-Dokumenten enthaltenen Informationen extrahieren und zur Verarbeitung an Softwareprogramme weiterleiten. Die Baumstruktur mit ihren untergliedernden *Markups* bzw. *Tags* (z.B. <DataName>...</DataName>) benötigt im Verhältnis zu den eigentlichen Nutzdaten (z.B. ID_7) einen hohen Anteil an

Begleitdaten und steigert das zu übermittelnde Datenvolumen. Um die Tags korrekt interpretieren zu können und somit die Informationen nutzbar zu machen, müssen Sender und Empfänger auf ein standardisiertes XML-Schema zurückgreifen.

Binärcode ist ausschließlich maschinenlesbar und benötigt nur wenige Begleitdaten. Eine Erweiterung oder Veränderung der enthaltenen Informationen ist mit hohem Aufwand verbunden, da dem Empfänger zur Entschlüsselung der Informationen die Abfolge der codierenden Bits bekannt sein muss (gemeinsamer Codierungsschlüssel). Sowohl bei der Verwendung des XML-Formats als auch bei Binärcodierung sind zusätzlich die Begleitdaten des genutzten Übertragungsstandards zu berücksichtigen (Header, Trailer), welche die zu übertragende Datenmenge erhöhen können (vgl. Abschnitt 3.1).

Datenformate in Abhängigkeit der Informationsart

Da die von den mobilen Transportrobotern eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs benötigten Informationen in Struktur und Menge stark variieren, schränkt die Festlegung auf ein einziges Datenformat die Flexibilität zu weit ein und wird der Forderung nach einer effizienten Übertragung aller benötigten Daten nicht gerecht. Daher sieht das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Kommunikationskonzept die Verwendung zweier unterschiedlicher Formen der Datencodierung in Abhängigkeit der zu übertragenden Informationsart vor. Für einfache aber zeitkritische Datensätze erfolgt eine Binärcodierung nach einem definierten Muster. Komplexe Informationen ohne strikte Zeitvorgaben werden als XML-Nachrichten ausgetauscht. Abbildung 5-2 verdeutlicht am Beispiel eines Schaltbefehls und eines Transportauftrags die Kriterien, welche die Auswahl des geeigneten Datenformats für einzelne Informationsarten beeinflussen.

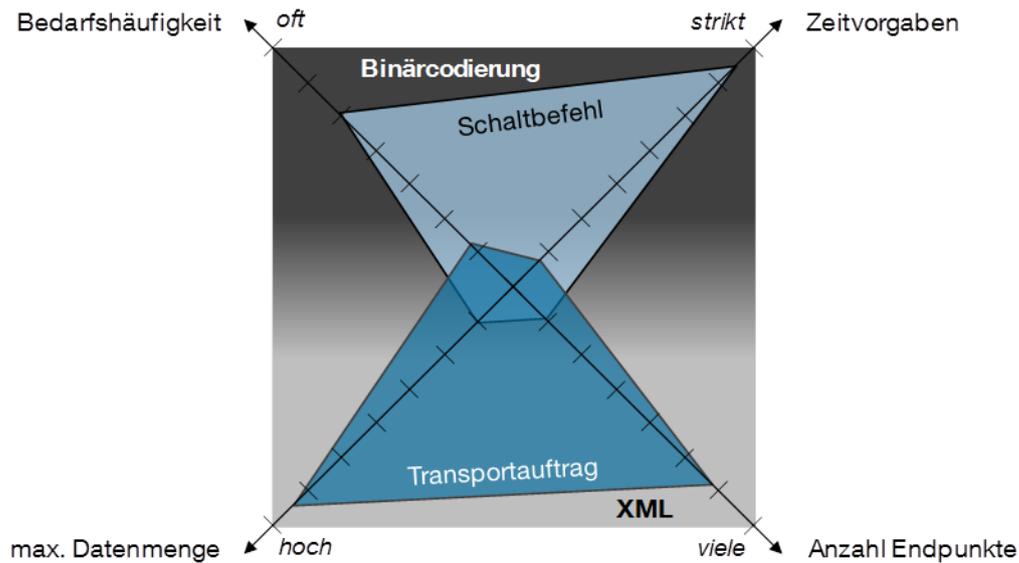


Abbildung 5-2: Auswahl geeigneter Datenformate in Abhängigkeit der Informationsart

Soll der Nachrichtenaustausch für beide Datenformate getrennt erfolgen, um eine gegenseitige Beeinflussung (z.B. Blockade einer binärcodierten Nachricht durch ein umfangreiches XML-Telegramm) zu vermeiden, ist die Nutzung verschiedener Kanäle eines Funkstandards oder eine parallele Nutzung zweier Kommunikationstechnologien (z.B. WLAN für XML, ZigBee für Binärcode) denkbar. Die zweite Lösungsalternative führt zu erhöhten Komponentenkosten, bietet im Gegenzug jedoch zwei komplett getrennte Kommunikationskanäle für Nachrichten mit strikten und mit weichen Zeitvorgaben (vgl. Abschnitt 4.3.2).

5.2.3 Fazit

Das technische Kommunikationskonzept baut auf gängigen Standards, Technologien und Datenformaten auf und berücksichtigt die unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Informationsarten. Das Konzept basiert auf lizenzfreien Funkstandards (IEEE 802.11, IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.4) und einer Übertragung von Nachrichten im XML-Format und/oder als Binärcode. Die Datenformate können den unterschiedlichen Informationsarten (vgl. Abschnitt 4.3.1, Tabelle 4-3) basierend auf deren Umfang, Struktur und zeitlichen Vorgaben (vgl. Abschnitt 4.3.2) zugeordnet werden. Das vorgestellte technische Kommunikationskonzept unterstützt somit die Erfüllung der in Abschnitt 5.1 formulierten Anforderungen. Neben der technischen Realisierung des Kommunikationssystems hängt die bedarfsgerechte Übermittlung von Informationen an die autonomen Flurförderzeuge auch von der Logik ab, der der Datenaustausch zwischen den Entitäten folgt. Im folgenden Abschnitt wird daher

ergänzend zum technischen Kommunikationskonzept ein logisches Konzept für die (Agenten-)Kommunikation in selbststeuernden Fahrzeugkollektiven präsentiert.

5.3 Logisches Kommunikationskonzept

Dieser Abschnitt stellt das logische Konzept zum Datenaustausch innerhalb des Fahrzeugkollektivs sowie zwischen den autonomen Flurförderzeugen und weiteren Kommunikationsteilnehmern (Softwaredienste, TE-Agenten, Softwareagenten anderer Fördertechnikmodule) vor. Wie in Abschnitt 2.1.3 bereits erwähnt, verringert sich zwar durch eine Verteilung der Steuerungslogik auf viele Akteure einerseits die Steuerungskomplexität im Vergleich zu hierarchisch organisierten Steuerungssystemen mit zentralisierten Steuerungsprogrammen. Andererseits führt jedoch die Notwendigkeit einer dezentralen Informationsbeschaffung in stark verteilten Systemen zu einem Anstieg der Kommunikationskomplexität und der Kommunikationslast [Chi-2010, S. 62].

Erfolgt der Datenaustausch in einem solchen System ausschließlich nach dem Peer-to-Peer-Prinzip (vgl. Abschnitt 3.1) mittels einer direkten Nachrichtenübertragung, so besteht die Gefahr von inkonsistenten Daten im System, da verschiedene Softwareagenten über unterschiedliche Versionen einer Information verfügen können. Ein anfragender Agent kann daher einen veralteten Datensatz als Antwort erhalten. Zudem erfolgen Anfragen in Peer-to-Peer-Systemen entweder über ein Fluten des Systems (Broadcast) oder der anfragende Agent muss den/die Lieferanten der benötigten Information im Vorfeld ermitteln. Beide Möglichkeiten steigern die Kommunikationslast zusätzlich.

Eine Alternative zur Peer-to-Peer-Kommunikation ist der Informationsaustausch über ein Blackboardsystem [Gün-2010a, S. 74f], das eine gemeinsame Datenaustauschplattform bereitstellt. Dabei findet kein direkter Nachrichtenverkehr zwischen den Softwareagenten statt. Diese Entkopplung von Sender und Empfänger führt zu einer Verringerung der Kommunikationskomplexität. Das logische Kommunikationskonzept für selbststeuernde Fahrzeugkollektive sieht eine Kombination beider Modelle vor, um einerseits einen einfachen Nachrichtenaustausch bei klar eingegrenzten Gesprächspartnern zu erlauben (z.B. Lastwechselkoordination) und andererseits die komplexe Sprechakte durch eine Informationsbündelung zu vermeiden. Den

Aufbau und die Funktionsweise von Blackboardsystemen beschreibt der folgende Abschnitt.

5.3.1 Einsatz eines Blackboardsystems

Der Begriff *Blackboard* bezeichnet ein architektonisches Muster, welches in Softwaresystemen zur Strukturierung von Prozessen der verteilten Problemlösung Verwendung findet [Phi-1993; Fat-1994; Cra-1995]. Seinen Ursprung hat das Blackboardmodell in der Anwendungsdomäne der Künstlichen Intelligenz (KI) [Nii-1986; Cor-1991]. Es weist Ähnlichkeiten zum Entwurfsmuster des Vermittlers (*mediator pattern*) auf, welches der Steuerung des kooperativen Verhaltens von Objekten dient [Gam-1995, S. 273-282]. Dem Blackboardmodell liegt eine Analogie zum Kommunikations- und Kooperationsverhalten in einer Expertengruppe zugrunde. Aufgabe der Gruppe ist es, kooperativ ein komplexes Problem zu lösen, welches für die einzelnen Gruppenmitglieder eigenständig nicht lösbar ist. Als Kooperationsplattform dient während des gemeinsamen Problemlösungsprozesses eine Tafel (engl. *blackboard*), auf der die Experten problemrelevante Informationen aus ihrem Wissensschatz bereitstellen und Zwischenergebnisse festhalten. Die veröffentlichten Zwischenergebnisse dienen wiederum den anderen Gruppenmitgliedern als Ansatzpunkt bzw. Trigger für eigene Beiträge. Gleichzeitig können einzelne Experten auch untereinander in Kleingruppen direkt (Peer-to-Peer) kommunizieren und diskutieren, um neue Lösungsansätze zu erarbeiten. Zielführende Lösungsansätze werden anschließend für alle sichtbar an der Tafel veröffentlicht.

Die softwaretechnische Umsetzung des Blackboardmodells sieht eine Speicherung der in einzelnen Teilprozessen generierten Informationen (z.B. bereitgestellt durch Softwareagenten) in einer hierarchisch organisierten Form vor. Andere Teilprozesse können bei Bedarf vom Blackboard über die Ablage oder Änderung relevanter Daten informiert werden. In diesem Mechanismus unterscheidet sich das Blackboardsystem von einer reinen Datenbankanwendung. Die Inhalte einer Datenbank sind für ihre Klienten (z.B. Teilprozesse) nur durch Abfragen zugänglich, während ein Blackboardsystem die Fähigkeit besitzt, seine Klienten aktiv mit Informationen zu versorgen. Zudem ermöglicht die indirekte, entkoppelte Kommunikation der Softwareagenten (bzw. der durch sie repräsentierten Teilprozesse) über ein vermittelndes Blackboard die parallele Abarbeitung nebenläufiger Prozesse.

Das im Rahmen dieser Arbeit entworfene Kommunikationskonzept nutzt das Blackboardmodell für den Datenaustausch zwischen Softwareagenten, die je nach Ausprägung ein Fördertechnikmodul (z.B. Fahrzeug), einen Softwaredienst (z.B. Auftragsagent) oder eine Transporteinheit (z.B. KLT) und deren Ziele repräsentieren. Die Agenten nutzen das Blackboardsystem, um Daten zu schreiben, zu lesen oder zu löschen. Zusätzlich ermöglicht das Blackboardsystem den Softwareagenten die Formulierung von detaillierten Suchanfragen. Der strukturierte Datenaustausch mittels Blackboard erhöht die Transparenz und die Nachvollziehbarkeit des Systemverhaltens eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs. Das Blackboard selbst oder ein spezieller Softwaredienst, der auf das Blackboard zugreift und sämtliche ein- und ausgehenden Nachrichten speichert (*Datalogging-Dienst*), kann die Inhalte der Agentenkommunikation aufzeichnen und auf diese Weise eine Historie des system-internen Datenaustauschs anlegen.

Das Blackboard übernimmt Grundfunktionen der Datenverwaltung (Zugriffssteuerung, Benachrichtigungsmechanismus), die einen sicheren und schnellen Datenaustausch unterstützen (Abbildung 5-3). Um die Persistenz systemrelevanter Informationen (z.B. Topologie, aktueller Systemzustand) zu gewährleisten, ist das Blackboard mit einem Datenbanksystem verbunden. Für die Anbindung ist eine Übersetzungsfunktionalität implementiert, die beliebige Dateninhalte unabhängig von ihrem Format in SQL-Befehle einbindet und auf diese Weise an die Datenbank übermittelt bzw. von dieser abfragt.

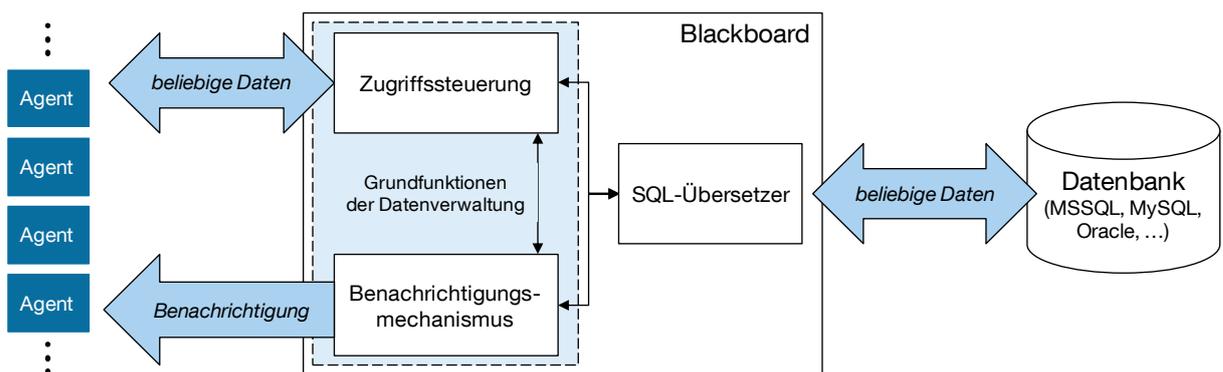


Abbildung 5-3: Funktionen und Komponenten des Blackboardsystems

Zugriffssteuerung

Um die Konsistenz der Daten auf dem Blackboard zu garantieren, müssen gleichzeitige Schreibzugriffe auf denselben Datensatz verhindert werden. Aus diesem Grund erhalten einzelne Softwareagenten bei Bedarf exklusive Schreibrechte für Bereiche

des Blackboards (z.B. Reservierungen). Exklusive Schreibzugriffe lassen sich über ein Token-Passing-Verfahren oder bereichsweisen Sperrungen auf dem Blackboard implementieren.

Bei einem Token-Passing-Verfahren erhalten die Blackboard-Nutzer (z.B. Softwareagenten) in vorgegebener Reihenfolge und in festgelegten Zeitintervallen Schreibrechte für das Blackboard. Für den Einsatz in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv ist dieses Verfahren ungeeignet, da bei einer großen Anzahl an Kommunikationsteilnehmern die zusätzlichen, nicht operativen Token-Durchlaufzeiten und der Verwaltungsaufwand dieses Verfahrens die Geschwindigkeit des Datenaustauschs stark reduziert. Dieser Effekt wird durch den Umstand verstärkt, dass auch Teilnehmer ohne akuten Schreibbedarf für das Blackboard den Token erhalten.

Das alternative Verfahren sieht die Wahrung exklusiver Schreibrechte durch zeitweise Sperrungen bestimmter Datensätze auf dem Blackboard vor. Die Schreibrechte werden den Nutzern durch das Blackboard zugeteilt und von diesem verwaltet. Abbildung 5-4 veranschaulicht das Prinzip der Zugriffssteuerung über Sperrungen. Die Agenten 2, 4 und 5 besitzen aktuell exklusive Schreibrechte für verschiedene Datensätze auf dem Blackboard. Die entsprechenden Datensätze sind mit der ID des Agenten markiert, der aktuell die exklusiven Änderungsrechte besitzt.

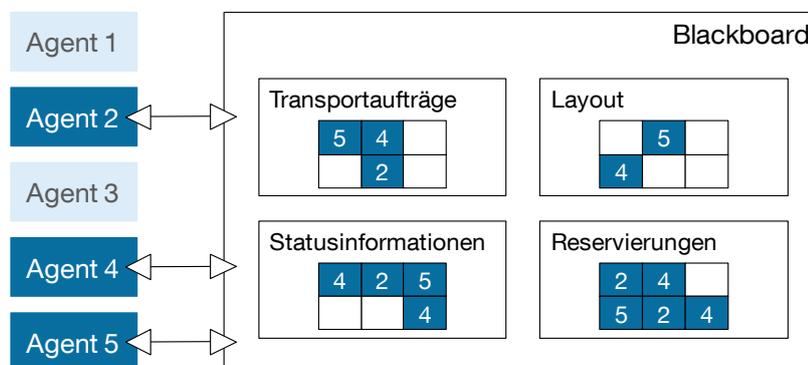


Abbildung 5-4: Zugriffssteuerung über Sperrungen

Die Sperrung der Bereiche endet mit der Freigabe durch den zugreifenden Agenten oder nach einer vorgegeben und vom Blackboard überwachten Frist (Abbildung 5-5). Für Daten, bei denen gleichzeitige Zugriffe aufgrund der Systemlogik ausgeschlossen sind (z.B. fahrzeugspezifische Statusinformationen), können Schreib- und Lesevorgänge komplett ohne Sperrung durchgeführt werden, wodurch sich der Koordinationsaufwand reduziert. Da diese Methode den Blackboard-Nutzern im Vergleich zum Token-Passing-Verfahren wesentlich größere Freiheiten bezüglich

Zeitpunkt und Dauer der Datenzugriffe lässt, ist sie für die Kommunikation in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv zu bevorzugen. Das Verfahren der Zugriffssteuerung über Sperrungen ist daher Bestandteil des in dieser Arbeit vorgestellten Kommunikationskonzepts.

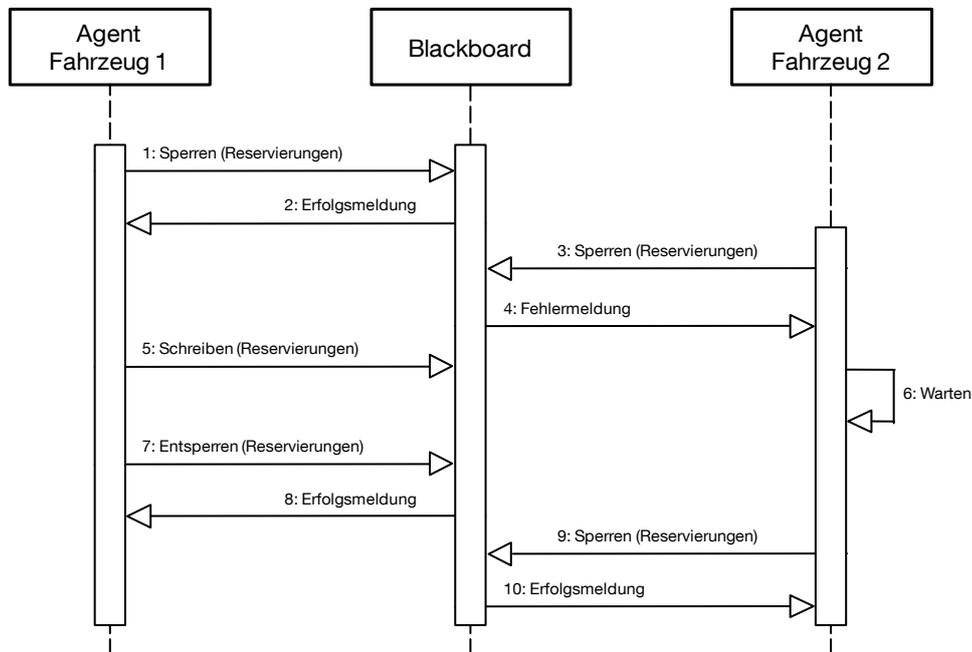


Abbildung 5-5: UML-Sequenzdiagramm der umgesetzten Zugriffssteuerung

Zur Vermeidung fehlerhafter Zugriffe auf das Blackboard wird das in Datenbanksystemen stark verbreitete *Transaktionskonzept* genutzt. Dieser Mechanismus garantiert, dass einzelne oder kombinierte Datenbankzugriffe entweder komplett verarbeitet oder ohne Änderung der Datenbankinhalte abgebrochen werden. Besteht eine Transaktion beispielsweise aus zwei Schreibaktionen, so wird bei einer fehlerhaften Verarbeitung des zweiten Schreibbefehls auch die vorangegangene Schreibaktion verworfen. Auf diese Weise können fehlerhafte Nachrichten der Blackboard-Nutzer abgefangen werden. Eine Speicherung der vorgenommenen Änderungen erfolgt erst, nachdem sämtliche Schritte einer Transaktion erfolgreich vollzogen sind.

Benachrichtigungsmechanismus

Ein Benachrichtigungsmechanismus sorgt dafür, dass Softwareagenten automatisch über die Ablage oder Änderung von Daten informiert werden, die für den von ihnen gesteuerten Teilprozess relevant sind. Vom Entwickler ist im Vorfeld festzulegen, für welche Dateninhalte des Blackboards vom Agenten zur Laufzeit Abonnements eingerichtet sind. Ein Softwareagent des Fördertechnikmoduls *Mobiler Transportrobo-*

ter kann beispielsweise automatisch über neue Transportaufträge informiert werden, die mit der von ihm angebotenen Funktion übereinstimmen (erreichbare Quelle, erreichbare Senke, transportierbare Ladeinheit). Abonnements ersparen dem Softwareagenten somit permanente Anfragen nach Informationen, die er zur Modulsteuerung benötigt. Im Gegensatz zur Kommunikation nach dem *Pull-Prinzip*⁶² handelt es sich bei der ereignisbasierten Benachrichtigung mittels Abonnements um eine Kommunikationsform nach dem *Push-Prinzip*, bei dem die Informationsquelle Nachrichten ohne Aufforderung an definierte Empfänger versendet (Abbildung 5-6).

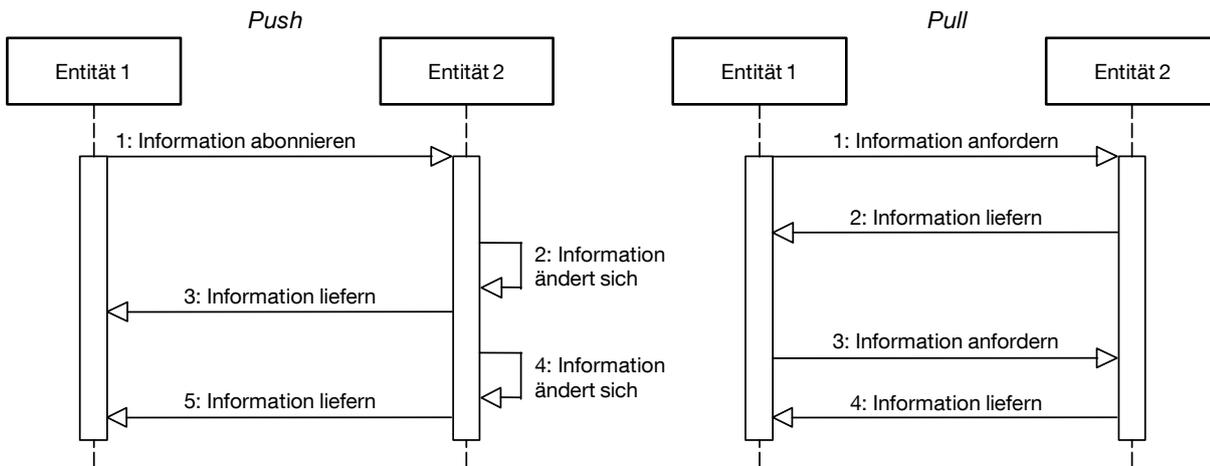


Abbildung 5-6: Informationsbeschaffung über Abonnements (Push-Prinzip, l.) im Vergleich zur Pull-Logik nach dem Anfrage/Antwort-Prinzip (r.)

Für den Datenaustausch nach dem Push-Prinzip reduziert sich die Anzahl der benötigten Nachrichten nach Abschluss des Abonnements im Vergleich zum Pull-Prinzip auf maximal die Hälfte. Beim Push-Prinzip werden darüber hinaus Nachrichten nur im Fall einer veränderten Informationslage versendet. Diese Beschränkung des Nachrichtenaufkommens ist beim Pull-Prinzip nicht möglich, da der anfragende Agent erst nach Erhalt der angeforderten Daten erkennt, ob diese eine für ihn neue Information enthalten. Abhängig von der durchschnittlichen Änderungsrate eines Datensatzes und der Anfragehäufigkeit des Blackboard-Nutzers kann dies zu einem hohen Anteil überflüssiger Nachrichten am gesamten Datenaustausch führen, wodurch das Kommunikationssystem unnötig belastet wird. Daher ist für die Kommu-

⁶² Ein Softwareagent fragt eine Information bei einem anderen Agenten an und erhält anschließend die benötigte Antwort, eine Fehlermeldung oder keine Rückmeldung (*Anfrage/Antwort-Prinzip*). Für eine gezielte Anfrage (Uni-/Multicast) muss dem Softwareagenten der potenzielle Informationslieferant bekannt sein. Ansonsten muss er über einen Broadcast sämtliche erreichbare Agenten befragen.

nikation in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv die Anwendung des Push-Prinzips grundsätzlich zu bevorzugen. Abbildung 5-7 zeigt den implementierten Benachrichtigungsmechanismus für das Blackboardsystem.

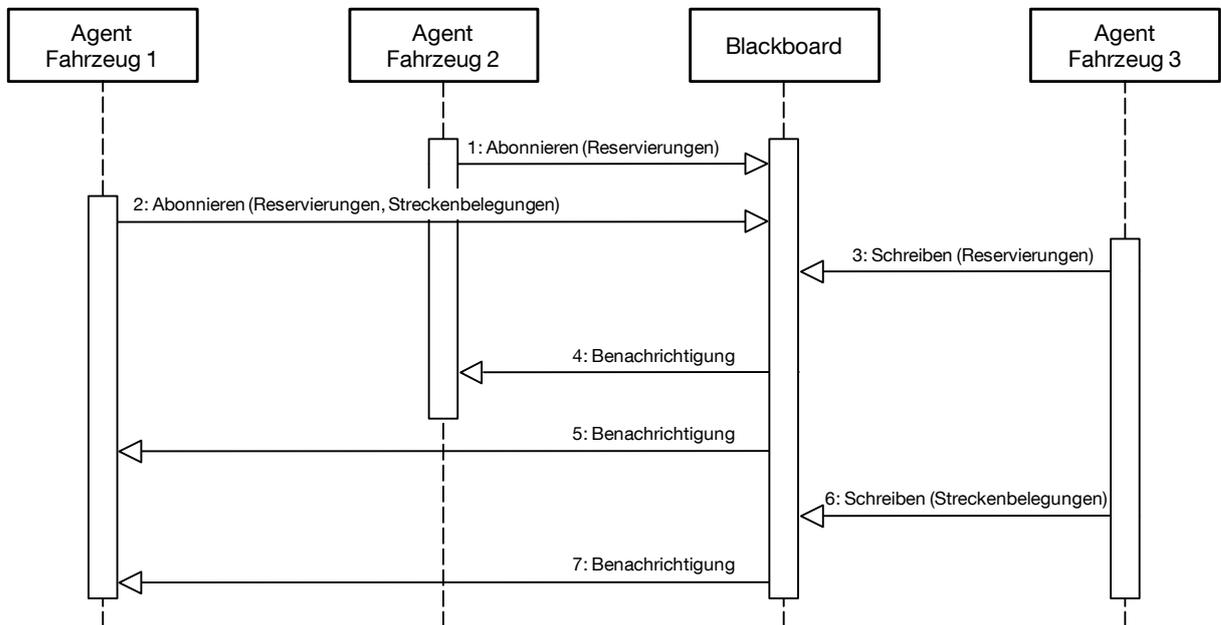


Abbildung 5-7: UML-Sequenzdiagramm des umgesetzten Benachrichtigungsmechanismus

Bei der Implementierung eines Datenaustauschsystems nach dem Push-Prinzip sind verschiedene Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Der Einsatz des Push-Prinzips ist dann sinnvoll, wenn der Informationsbedarf des Abonnenten über lange Zeiträume konstant bleibt, da ansonsten das häufige Anlegen und Kündigen von Abonnements die Einsparung der Anfragen im Vergleich zum Pull-Prinzip aufwiegt. Bedingt geeignet für ein Abonnement sind Informationen, die sich bedeutend häufiger ändern, als der Empfänger sie benötigt (z.B. Ortsinformationen eines anderen Fahrzeugs in Millimeter-Schritten). Dieser Problematik kann durch die Festlegung eines minimalen Zeitintervalls zwischen zwei Benachrichtigungen oder durch ein Ausweichen auf das Pull-Prinzip begegnet werden.

Schnittstellenfunktion zu übergeordneten Systemen

Ist das selbststeuernde Fahrzeugkollektiv auf Daten aus übergeordneten Informationssystemen (z.B. LVS, WMS, ERP-System) angewiesen, so kann das Blackboardsystem als einheitliche Schnittstelle zu diesen Systemen dienen (Abbildung 5-8). Dieser Fall tritt v.a. dann auf, wenn die Transporteinheiten ihre

Transportziele nicht selbst verwalten und daher Auftragsdaten außerhalb der Systemgrenzen generiert werden.

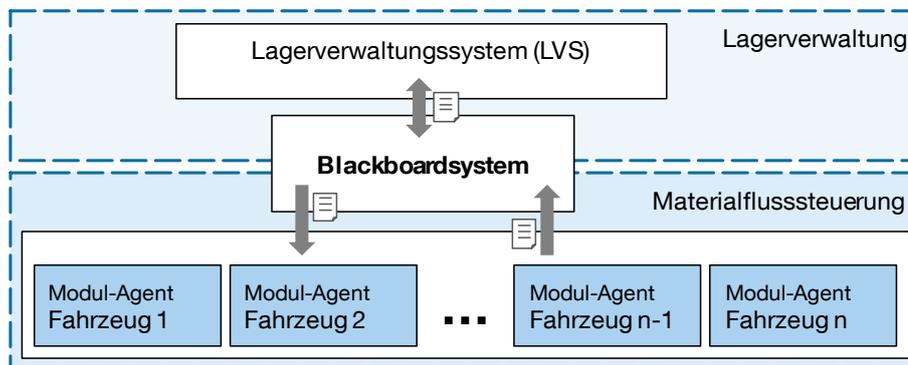


Abbildung 5-8: Das Blackboardsystem als Schnittstelle zu übergeordneten Informationssystemen

In seiner Schnittstellenfunktion ermöglicht das Blackboard einen bidirektionalen Datenaustausch zwischen dem internen Kommunikationsnetzwerk eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs und externen Netzwerken. Zu diesem Zweck abstrahiert das Blackboard die jeweiligen, meist herstellerspezifischen Schnittstellen. Der SQL-Übersetzer des Blackboards wird genutzt, um Anfragen der Softwareagenten in strukturierte Datenbankabfragen an übergeordnete Informationssysteme zu überführen. Umgekehrt überträgt das Blackboardsystem Rückmeldungen der übergeordneten Systeme in agentenlesbare Nachrichten, die für eine Verarbeitung im internen Kommunikationsnetzwerk geeignet sind. Die vorhandenen Grundfunktionen der Datenverwaltung nutzt das Blackboard, um einzelne Datenzugriffe und Nachrichten zu priorisieren.

Vergleich von Peer-to-Peer- und Blackboard-Kommunikation

Tabelle 5-5 stellt zusammenfassend funktionale Aspekte von Peer-to-Peer- und Blackboard-Kommunikation gegenüber und arbeitet Potenziale und Risiken beider Modelle heraus. Das für die Anwendung in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv entwickelte Kommunikationskonzept sieht, wie oben erwähnt, eine hybride Mischform beider Kommunikationsmodelle vor. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, die Potenziale beider Kommunikationsformen zu nutzen und gleichzeitig die jeweiligen Nachteile zu minimieren.

Tabelle 5-5: Gegenüberstellung funktionaler Aspekte der BB- und P2P-Kommunikation (in Anlehnung an [Chi-2010, S. 67])

	Peer-to-Peer (P2P)	Blackboardsystem (BB)
Auffinden der Kommunikationspartner	<ul style="list-style-type: none"> Suche nach konkreten Kommunikationspartnern / Kontaktaufnahme Nutzung eines Verzeichnisdienstes oder Fluten des Netzwerks mit entsprechender Anfrage 	<ul style="list-style-type: none"> Keine direkte Kommunikation, sondern nur mit BB Keine Suche nach Kommunikationspartnern Eigenverantwortung der Softwareagenten für Veröffentlichung / Beschaffung relevanter Informationen
Datenkonsistenz	<ul style="list-style-type: none"> Gefahr von Inkonsistenzen durch hochgradige Verteilung und hohe Anzahl von Kopien der Datensätze Gewährleistung der Datenkonsistenz durch Mechanismen zum Aufspüren / Auflösen der Inkonsistenzen 	<ul style="list-style-type: none"> Gewährleistung der Datenkonsistenz auf BB durch Zugriffssteuerung
Datenredundanz	<ul style="list-style-type: none"> Replikation der Informationen durch einzelne Einheiten (theoretisch beliebig oft → speicherplatzabhängig) Hohe Robustheit im P2P-Netz gegenüber Ausfällen 	<ul style="list-style-type: none"> Einzige vertrauenswürdige Kopie aller Systeminformationen auf BB BB als kritischer Single Point of Failure
Zentrale Datenverfügbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> Datenakquise durch Fluten des gesamten Netzwerkes (<i>Broadcast</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> BB als zentraler Datenspeicher für Gesamtsystem Verfügbarkeit sämtlicher Daten
Aufzeichnung von Historien	<ul style="list-style-type: none"> Lokale Protokolle einzelner Softwareagenten Nachverfolgung globaler Zusammenhänge durch Zusammenführung / Synchronisation lokaler Historien 	<ul style="list-style-type: none"> Protokollierung aller Lese-, Schreib-, Löschoptionen durch BB oder externen (Service-)Agenten möglich

Steigerung der Robustheit von Blackboardsystemen

Aus Tabelle 5-5 lässt sich eine Schwachstelle, die mit dem Einsatz von Blackboardsystemen verbunden sind, ablesen. Ein Blackboard stellt einen Single Point of Failure dar und kann als zentraler Kommunikationsknoten Engpässe beim

Datenaustausch verursachen. Aus diesem Risiko lässt sich ein Entwicklungsbedarf ableiten, der in diesem Abschnitt untersucht wird.

Ziel ist eine Steigerung der Robustheit gegenüber Ausfällen aufgrund von Softwarefehlern (Systemabsturz), da diese den Datenaustausch innerhalb des selbststeuerten Fahrzeugkollektivs stark beeinträchtigen können. Der Ausfall eines Blackboardsystems über einen längeren Zeitraum führt zu einem Stillstand des Fahrzeugkollektivs aufgrund fehlender Informationen für die Fahrzeugsteuerung.

Die Robustheit eines Blackboardsystems wird zusätzlich durch dessen Leistungsfähigkeit in Form des beherrschbaren Datenaufkommens beeinflusst. Auch in dieser Hinsicht ist die Nutzung eines einzelnen Blackboards mit Risiken verbunden, da dessen Ressourcen (Rechen- und Speicherkapazität) nur eingeschränkt einfach skalierbar und plattformgebunden sind. Dies kann zu Engpässen bei der Vermittlung und Verwaltung umfangreicher Daten führen (Bottleneck-Problematik). Tabelle 5-6 zeigt verschiedene Lösungsansätze zur Steigerung der Robustheit und flexibleren Skalierbarkeit der Leistungsfähigkeit von Blackboardsystemen.

Da die beiden erstgenannten Maßnahmen *Nutzung eines Rückfallsystems* und *Einsatz leistungsfähiger Rechnerhardware* im Gegensatz zum *Parallelbetrieb verteilter Blackboards* jeweils nur eine der beiden Problemstellungen (Robustheit, Skalierbarkeit) adressieren, sind sie lediglich als ergänzende Maßnahmen zu sehen. So kann die Peer-to-Peer-Kommunikation der Überbrückung kurz andauernder Störungen einzelner Blackboards in einem verteilten Blackboardsystem dienen. Um die Robustheit und die Leistungsfähigkeit des Kommunikationssystems nicht zu gefährden, müssen ausgefallene Blackboards jedoch nach kurzer Zeit (wenige Sekunden) wieder zur Verfügung stehen. Stößt das Blackboardsystem bezüglich Reaktionszeiten und Kapazitäten an seine Grenzen, kann alternativ zu einer Erweiterung um zusätzliche Blackboard-Agenten auch ein Ausbau der Rechnerkapazitäten der bestehenden Blackboards Engpässe auflösen.

Tabelle 5-6: Lösungsansätze zur Steigerung der Robustheit und flexibleren Skalierbarkeit der Leistungsfähigkeit von Blackboardsystemen

Lösungsansätze	
Maßnahme	Nutzung eines Rückfallsystems Datenaustausch ausschließlich nach dem Peer-to-Peer-Prinzip
Prinzip	Teilnehmer erkennen den BB-Ausfall und versuchen, alle für sie relevanten Daten per Peer-to-Peer-Kommunikation zu erhalten.
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • bereits implementiertes Kommunikationsmodell wird genutzt • kein zusätzlicher Koordinationsaufwand für das Kommunikationssystem
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • aufwendiges Auffinden der korrekten Kommunikationspartner • Anstieg der Kommunikationslast im System (vielen unnötige Anfragen) • reduzierte logistische Leistung des Gesamtsystems • evtl. Ausfall des Datenaustauschs mit übergeordneten Ebenen
Maßnahme	Einsatz leistungsfähiger Rechnerhardware Gesteigerte Leistungsparameter der Blackboard-Plattform
Prinzip	Als Blackboard-Plattform kommen erweiterbare Rechner mit erhöhten Leistungsparametern (z.B. Taktung, Arbeitsspeicher) zum Einsatz.
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Leistungsfähigkeit verringert das Risiko von Leistungsengpässen bei der Datenverarbeitung • Skalierbarkeit der Speicherkapazität analog zu Servern über Speicherbausteine bzw. Festplatten
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • erhöhte Hardwarekosten für leistungsstarke Komponenten sowie für eine spätere Skalierung (Erweiterung) der Leistungsfähigkeit • Blackboard weiterhin Single Point of Failure im Kommunikationssystem
Maßnahme	Parallelbetrieb verteilter Blackboards Datenaustausch über mehrere parallel betriebene Blackboards
Prinzip	Mehrere, verteilte Blackboards sichern sich gegenseitig ab (ähnlich zu Hochverfügbarkeitslösungen für Datenbanksysteme).
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Ausfall einzelner Blackboards führt bei entsprechender Skalierung zunächst zu keinerlei Leistungseinbußen. • Einleitung eines Neustarts ausgefallener Blackboards möglich (Selbstüberwachung und <i>Selbsteilung</i>) • hohe Robustheit gegenüber Ausfällen einzelner Blackboards • verringertes Datenaufkommen pro Blackboard durch Verteilung des Datenaustauschs auf mehrere Blackboards • Skalierbarkeit der Leistungsfähigkeit durch Erhöhung der BB-Anzahl • Möglichkeit der Umverteilung lokaler Überlasten auf andere Blackboards • Spezialisierung einzelner Blackboards denkbar (orts-/funktionsabhängig)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • zusätzlicher Ressourcenbedarf durch weitere Blackboard-Agenten • zusätzlicher Koordinationsaufwand für das Kommunikationssystem

Als Grundkonzept für ein robustes, einfach skalierbares Blackboardsystem ist aufgrund der in Tabelle 5-6 aufgeführten Eigenschaften der Parallelbetrieb mehrerer Informationsknotenpunkte am besten geeignet. Im Hinblick auf die dafür notwendige Weiterentwicklung des Blackboard-Konzepts im Rahmen dieser Arbeit wird im Folgenden aus Gründen der Nachvollziehbarkeit zwischen Kommunikationssystemen

- mit einem einzigen Blackboard und
- verteilten Blackboardsystemen mit parallelen Informationsknotenpunkten

unterschieden und die Bezeichnungen *Single Blackboard System* (BB_1) und *Distributed Blackboard System* (BB_d) eingeführt. Der folgende Abschnitt beschreibt das Konzept eines Distributed Blackboard Systems und stellt Mechanismen zur Erkennung und Beseitigung von Fehlerzuständen einzelner Blackboards sowie Ansätze zur Spezialisierung von Informationsknotenpunkten in einem verteilten Blackboardsystem vor.

5.3.2 Parallelbetrieb verteilter Blackboards

Das logische Kommunikationskonzept sieht den Einsatz von Informationsknotenpunkten (Blackboards) zur Bündelung und Reduzierung der Kommunikationslast vor. In Bezug auf einen sicheren und zuverlässigen Betrieb eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs übernimmt das Blackboard eine wichtige Funktion, indem es die zur Selbststeuerung der Fahrzeuge benötigten Daten bereitstellt. Ein Single Blackboard System (BB_1) mit einem einzigen Informationsknotenpunkt stellt für das Kommunikationssystem daher, wie oben erwähnt, einen kritischen Single Point of Failure dar [Fuj-2000]. Ein Ausfall dieser Komponente ist mit hohen Risiken für das Gesamtsystem verbunden. Dieser Abschnitt beschreibt ein neuartiges Konzept zum Parallelbetrieb mehrerer, logisch miteinander verknüpfter Blackboards zur Steigerung der Robustheit und der Performanz von Blackboardsystemen im industriellen Einsatz. Wie oben erwähnt wird dieser Ansatz im Rahmen dieser Arbeit unter der Bezeichnung *Distributed Blackboard System* (verteilt Blackboardsystem, BB_d) eingeführt (Abbildung 5-9).

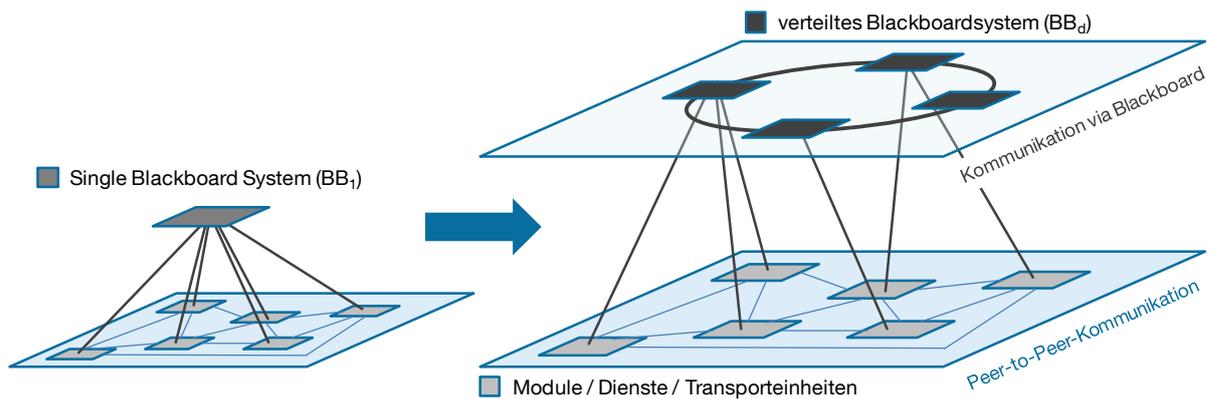


Abbildung 5-9: Logisches Kommunikationskonzept als Kombination aus direkter (Peer-to-Peer) und indirekter Kommunikation (via Blackboardsystem) zwischen den Softwareagenten

Ein Hinzufügen weiterer Blackboard-Agenten zum verteilten Blackboardsystem ist mit geringem Aufwand möglich, da das Entwurfsmuster eines Blackboards im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Softwareagent nach FIPA-Spezifikation unter Nutzung von Bibliotheken des JADE Frameworks (vgl. Abschnitt 2.2.3, *Agentensysteme*) implementiert ist. Daher können beim Start oder zur Laufzeit des Blackboardsystems weitere Instanzen der Klasse `Blackboard` gestartet werden. Diese zusätzlichen Klasseninstanzen müssen über die Agent-ID eindeutig benannt werden (z.B. `BB2`). Dies kann beispielsweise über Ergänzungen in einer einfachen Konfigurationsdatei (Textdatei) geschehen, die beim Start des Blackboardsystems geladen wird. Die parallel gestarteten Blackboard-Agenten müssen anschließend als verteiltes Blackboardsystem organisiert werden, um Ausfälle einzelner Blackboards erkennen und ausgleichen bzw. beheben zu können und die Nachrichtenverarbeitung lastabhängig untereinander aufzuteilen.

Die folgenden Abschnitte fokussieren daher Mechanismen zur Selbstüberwachung, automatischen Verknüpfung und Fehlerbehandlung in einem verteilten Blackboardsystem und stellt eine konkrete softwaretechnische Umsetzung vor. Die adaptive Verteilung von Kommunikationslasten zwischen den Knotenpunkten wird am Rande der Untersuchung einer Spezialisierung einzelner Blackboards auf bestimmte Informationsarten (z.B. Daten für Visualisierungsdienste) betrachtet. Zur adaptiven Lastverteilung in Distributed Blackboard Systems besteht jedoch über diese Arbeit hinaus weiterer Forschungsbedarf.

Selbstüberwachung und Fehlerbehandlung in verteilten Blackboardsystemen

Eine automatische Fehlerbehandlung in einem verteilten Blackboardsystem dient der permanenten Aufrechterhaltung der Kommunikation zwischen den Blackboard-Nutzern. Dafür ist eine hohe Verfügbarkeit des Blackboardsystems Grundvoraussetzung. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Mechanismen zur Steigerung der Verfügbarkeit untersucht. Wichtige Ansatzpunkte für derartige Mechanismen finden sich in Datenbanksystemen wie ORACLE oder MySQL. Ein wichtiges Grundprinzip für hochverfügbare Datenbanken ist die Vermeidung singulärer Fehlerquellen durch eine wechselwirkungsfreie und redundante Auslegung von Komponenten. So sind MySQL-Cluster als sogenannte *Shared-Nothing-Datenbankcluster* ausgeführt [MYS-2007]. Shared-Nothing (SN) bedeutet, dass jeder Datenknoten über eine Kopie des Datenbank-Management-Systems verfügt und seine Aufgaben mit eigenem Prozessor und zugeordneten Speicherkomponenten eigenständig und unabhängig von anderen Knoten erfüllen kann [Sto-1986].

Zudem kann jeder Knoten Aufgaben an andere, nicht ausgelastete Knoten weiterleiten. Einen weiteren wichtigen Mechanismus stellt das sogenannte *Failover* dar, das einen manuellen oder automatischen Wechsel zwischen redundanten Netzwerkdiensten im Störfall ermöglicht. Das Zusammenwirken dieser Mechanismen (unabhängige Komponenten, redundante Datenhaltung, automatische Fehlerbehebung) führt zu einer extrem hohen Fehlertoleranz derartiger Datenbanksysteme.

Da ein Blackboardsystem mit wesentlich geringerem Aufwand und Ressourcenbedarf (Rechenleistung, Speicherplatz) als ein Datenbanksystem implementiert werden soll, sind die oben genannten Mechanismen nur eingeschränkt übertragbar. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu berücksichtigen, dass zur Gewährleistung der Persistenz bestimmter Daten (z.B. letzter Status der Softwareagenten, Topologiedaten) ergänzend zu einem Blackboardsystem ein Datenbanksystem eingesetzt werden kann. Dieses Datenbanksystem bietet bereits entsprechende Eigenschaften (z.B. hohe Verfügbarkeit, automatische Fehlererkennung, konsistente Datenhaltung) und kann somit als ausfallsichere Komponente des Kommunikations- bzw. Datenaustauschsystems angesehen werden. Der Zugriff auf die Datenbank muss jedoch auch beim Ausfall einzelner Blackboards möglich sein.

Im Folgenden werden zwei Mechanismen zur Erhöhung der Fehlertoleranz eines verteilten Blackboardsystems vorgestellt. Der erste Ansatz macht sich die Implementierung der einzelnen Blackboards als Softwareagenten nach FIPA-Spezifikation zunut-

ze. Voraussetzung für diesen Mechanismus ist eine einmalige Registrierung sämtlicher Blackboards bei jeweils einem anderen Informationsknotenpunkt in 1:1-Beziehung während der Initialisierungsphase und die Programmierung einer zusätzlichen Methode für den Neustart eines beobachteten Blackboards beim Eintreffen einer entsprechenden Benachrichtigung.

Vor dem Stoppen eines Blackboard-Agenten im Falle eines Fehlerzustands sendet dieser eine Take-Down-Benachrichtigung (`<envelope> <takedown> <Blackboard takedown="true"/> </takedown> </envelope>`) an die bei ihm registrierten Softwareagenten und informiert das Blackboard, bei dem es selbst registriert ist, über sein Herunterfahren (`<envelope> <deregister> <Blackboard takedown="true"/> </deregister> </envelope>`). Das informierte Blackboard startet anschließend das abgestürzte Blackboard über das Agent Management System (AMS) innerhalb kurzer Zeit neu (Abbildung 5-10). Dem neu gestarteten Blackboard wird seine ursprüngliche Agent-ID zugewiesen. Somit ist es für zuvor bei ihm registrierte Modul-Agenten und Softwaredienste wieder auffindbar.

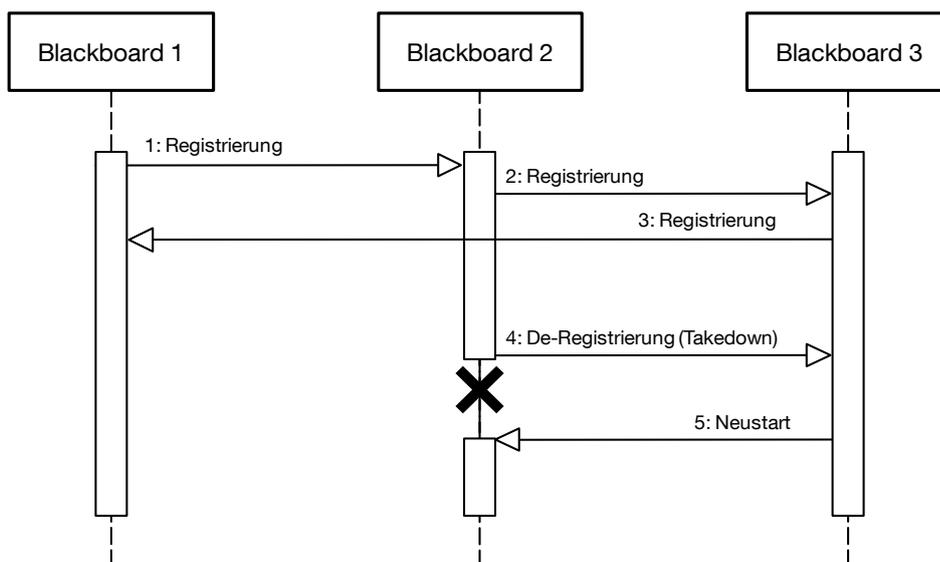


Abbildung 5-10: Überwachungsmechanismus für verteiltes Blackboardsystem

In einem zweiten Konzept erfolgt die Erkennung von Funktionsstörungen durch die Blackboard-Nutzer (z.B. Modul-Agenten, Softwaredienste) (Abbildung 5-11). Diese erkennen am Ausbleiben erwarteter Antwortnachrichten (z.B. Erfolgsmeldung) einen möglichen Ausfall des von ihnen genutzten Blackboards. Um die eigene Kommunikationsfähigkeit aufrecht zu erhalten, registrieren sich die Modul-Agenten nach einer

vordefinierten Zeitspanne bei einem anderen Informationsknotenpunkt des verteilten Blackboardsystems.

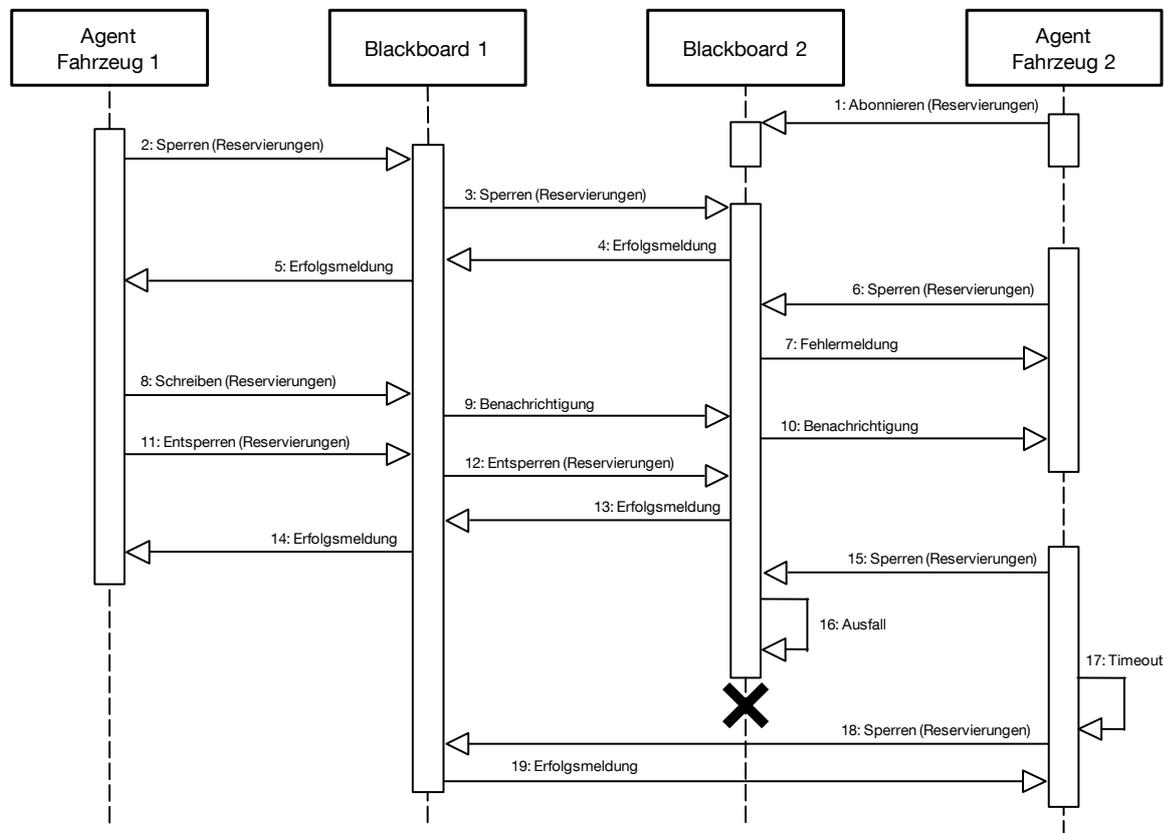


Abbildung 5-11: Fehlererkennung bei parallel betriebenen Blackboards

Dieser automatische Erkennung eines Blackboard-Ausfalls muss der Neustart eines Blackboard-Agenten folgen, um so die ursprünglich vorgesehene Systemleistung und -robustheit wiederherzustellen. Aus diesem Grund ist auch in diesem zweiten Konzept eine gegenseitige Überwachung der Blackboards innerhalb eines logischen Rings vorgesehen. Allerdings erfolgt die logische Verknüpfung der Blackboard-Agenten in diesem Fall per Nachrichten-Abonnement (vgl. Abschnitt 5.3.1) bei jeweils einem anderen Blackboard⁶³ (1:1-Beziehung). Der abonnierende Blackboard-Agent erwartet in einem definierten Takt eine einfache Nachricht vom durch ihn beobachteten Blackboard. Bleibt diese zyklische Benachrichtigung aus, ist von einem Ausfall des überwachten Blackboards auszugehen.

Ein Blackboard, das eine solche Störung feststellt, richtet, um den logischen Ring wieder zu schließen, zunächst ein neues Abonnement bei dem Informationsknoten-

⁶³ Auf diese Weise können auch sämtliche Inhalte der Blackboards synchronisiert werden.

punkt ein, welcher vom ausgefallenen Blackboard beobachtet wurde. Den aktuell nicht mehr überwachten Informationsknotenpunkt findet das suchende Blackboard über eine Anfrage an alle verbliebenen Informationsknotenpunkte unter Verwendung der Agent-ID des ausgefallenen Blackboards. Da das ausgefallene Blackboard mit dieser ID ausschließlich beim gesuchten Blackboard registriert ist, sendet nur dieses eine Antwort auf die Anfrage. Gleichzeitig initiiert der Blackboard-Agent, der den Blackboard-Ausfall festgestellt hat, beim AMS die Instanziierung eines neuen Blackboards, um die ursprüngliche Struktur des Blackboardsystems wiederherzustellen. Dem neu gestarteten Blackboard-Agent wird die Agent-ID des ausgefallenen Blackboards zugewiesen.

Nach dem Neustart des ausgefallenen Blackboards wird die ursprüngliche Konfiguration des verteilten Blackboardsystems wieder eingerichtet. Dazu sucht das Blackboard, das die Störung diagnostiziert hat, innerhalb des Agentensystems zyklisch nach der Agent-ID des ausgefallenen Blackboards. Sobald diese auffindbar ist, richtet das suchende Blackboard erneut ein Nachrichten-Abonnement ein und übernimmt die Beobachtung des neu gestarteten Informationsknotens. Gleichzeitig fordert es den neu gestarteten Blackboard-Agenten auf, sein durch den Ausfall erloschenes Abonnement wieder einzurichten und somit den logischen Ring zu schließen. Abschließend löscht das Blackboard, das die Fehlerbehebung koordiniert hat, sein provisorisches Abonnement beim nun wieder durch das erneuerte Blackboard überwachten Informationsknotenpunkt.

Modul-Agenten und Softwaredienste, die beim ausgefallenen Blackboard registriert waren, erkennen nach dem oben beschriebenen und in Abbildung 5-11 gezeigten Verfahren die Störung selbstständig und melden sich automatisch bei einem der verbleibenden Informationsknoten an. Nachdem wieder die ursprüngliche Anzahl an Blackboards im Kommunikationssystem verfügbar ist, ist eine gleichmäßige Verteilung der Blackboard-Nutzer auf die Informationsknotenpunkte anzustreben. Grundlage dafür sind Auslastungsstatistiken der einzelnen Blackboards sowie ein entsprechender Benachrichtigungsmechanismus, der einzelne Softwareagenten zur Nutzung alternativer Informationsknotenpunkte auffordert.

Nachteilig an diesem zweiten Konzept ist zum einen der hohe Koordinationsaufwand für die Fehlerbehebung, der sich in einer gesteigerten Komplexität der Blackboard-Agenten niederschlägt. Zum anderen kommt es durch die Abonnements zu einem wesentlich höheren Nachrichtenaufkommen im Vergleich zum ersten Ansatz. Ab-

hängig von der Anzahl an Blackboards b im Blackboardsystem und der Anzahl an Benachrichtigungszyklen im Rahmen des Abonnements a ergibt sich die Anzahl der Nachrichten m , die nur der Selbstüberwachung des Blackboardsystems dienen, gemäß der Formel:

$$m = b + b a = b (1 + a) \quad (5-1)$$

Die Anzahl der Benachrichtigungszyklen a hängt wiederum von der gewählten Zykluszeit des Abonnements z und der betrachteten Laufzeit des verteilten Blackboardsystems t ab:

$$a = \frac{t}{z} \quad (5-2)$$

So generiert ein verteiltes Blackboardsystem bestehend aus fünf Blackboards ($b = 5$) bei einer Abonnement-Zykluszeit von fünf Sekunden ($z = 5s$) innerhalb eines (störungsfreien) Betrachtungszeitraums von 14 Stunden (2-Schicht-Betrieb, $t = 50.400s \Rightarrow 10.080$ Abonnement-Zyklen) ein Nachrichtenaufkommen im Rahmen der Selbstüberwachung der Blackboards von über 50.000 Nachrichten. Im zuvor vorgestellten Konzept mit aktiver Abmeldung gestörter Blackboard-Agenten stehen dieser Zahl bei gleichen Rahmenbedingungen lediglich fünf Nachrichten (einmalige Registrierung bei je einem anderen Blackboard) gegenüber. Der Validierung des logischen Kommunikationskonzepts in Kapitel 6 liegt daher das erste Konzept zur Fehlerbehebung auf Basis von Take-Down-Benachrichtigungen zugrunde.

Im Fall schwerwiegender elektrischer oder mechanischer Störungen (z.B. Stromausfall, defekte Rechen- oder Speichereinheiten) können die beiden vorgestellten Alternativen zur automatischen Fehlerbehebung die ursprünglich kalkulierte Zuverlässigkeit und Systemleistung nicht ohne äußeren Eingriff (Wiederherstellung der Stromversorgung, Austausch/Instandsetzung der defekten Komponenten) gewährleisten. Im Vergleich zu einem Single Blackboard System mit nur einem Blackboard sinkt jedoch die Wahrscheinlichkeit für einen kompletten Ausfall des Blackboardsystems durch den Parallelbetrieb verteilter Informationsknotenpunkte.

Spezialisierung verteilter Blackboards

Die Erweiterung des Blackboardmodells zu einem Distributed Blackboard System mit mehreren parallel agierenden Informationsknotenpunkten bietet neue Möglich-

keiten für die Abwicklung der Kommunikation innerhalb verteilter Anwendungen (z.B. Agentensystem). So kann eine Lastverteilung zwischen den einzelnen Knoten in Abhängigkeit von deren momentaner Auslastung vorgenommen werden.

Ein weiterer Ansatz sieht eine Spezialisierung verteilter Blackboards nach verschiedenen Kriterien vor, um so das Datenvolumen pro Blackboard zu reduzieren und Leistungsengpässen vorzubeugen. Denkbar ist eine räumliche (z.B. beschränkt auf Daten aus Lagervorzone) oder eine funktionale (z.B. beschränkt auf Auftragsdaten) Spezialisierung einzelner Blackboards. Eine räumliche Spezialisierung ist nur dann sinnvoll, wenn sich der Einsatzbereich der Fördertechnikmodule in mehrere Zonen einteilen lässt oder die Module bereichsübergreifend eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 4.2.2). Ist dies der Fall, so besitzen manche Daten nur örtlich beschränkt Informationswert (z.B. Streckenreservierungen) und können daher gebündelt werden. Ein Beispiel für die Spezialisierung der Blackboards nach räumlichen Kriterien findet sich im Rahmen der Validierung in Abschnitt 6.2.

Eine Spezialisierung einzelner Blackboards auf die Verarbeitung von ausgewählten Daten, die für bestimmte Funktionen (z.B. Auftragsdisposition, Visualisierung) benötigt werden, widerspricht der in Abschnitt 5.3.1 formulierten Fähigkeit des Blackboardmodells zur Verarbeitung beliebiger Daten. Nachteilig wirken sich bei diesem Ansatz der erhöhte Verwaltungsaufwand und die Restriktionen bei der Verteilung oder der Replikation von Daten aus. So sind die spezialisierten Blackboards nicht für eine Speicherung und Verarbeitung anderer als der für sie vorgesehenen Informationsarten nutzbar. Das Ziel einer gleichmäßigen Lastverteilung zwischen den Informationsknotenpunkten ist daher nicht erreichbar. Aufgrund dieser Nachteile wird eine funktionale Spezialisierung einzelner Blackboards im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt. Besser geeignet für die Sammlung funktionsrelevanter Daten sind spezialisierte Softwaredienste zu bewerten, die gezielt auf Daten aus den verteilten Blackboards zugreifen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass jegliche Art der Spezialisierung einzelner Blackboards mit einigen grundlegenden Eigenschaften, die ein verteiltes Blackboardsystem aufweisen soll, im Widerspruch steht. Aus Gründen der Skalierbarkeit und Robustheit sollen sämtliche Blackboards beliebige Daten aufnehmen können und analog zur oben erwähnten Shared-Nothing-Architektur anhand von Zugriffs- und Auslastungsstatistiken die Kommunikationslast untereinander frei ver-

teilen. Nur so lassen sich geringe Kommunikationszeiten bei einer gleichzeitig hohen Verfügbarkeit erreichen.

Redundante Datenhaltung und Synchronisation

Eine redundante Datenhaltung lässt sich in einem verteilten Blackboardsystem realisieren, wenn einzelne Datensätze jeweils auf mindestens zwei Informationsknotenpunkten gespeichert werden. Die Verwaltung der Speicherorte kann innerhalb des Blackboardsystems mittels einer verteilten Hash-Tabelle (engl. *distributed hash table*) erfolgen [Urd-2011]. Dieser Ansatz unterstützt eine gleichmäßige Verteilung der Daten auf sämtliche Blackboards. Diese selbstorganisierende Datenstruktur einer verteilten Hash-Tabelle ist in der Lage, Beitritte, Abmeldungen und Ausfälle einzelner Knoten abzubilden und kann daher ein verteiltes Blackboardsystems sinnvoll ergänzen. Allerdings erfordert eine redundante Datenhaltung innerhalb einer verteilten Blackboard-Architektur zusätzliche Funktionen zur Synchronisation der einzelnen Informationsknotenpunkte, um eine systemweite Datenkonsistenz zu gewährleisten. Zudem erhöht sich die zu speichernde Datenmenge mindestens um den Faktor Zwei. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dieses Konzept daher nicht weiterverfolgt. Es wird alternativ auf die Speicherung wichtiger Daten in einem Datenbanksystem zurückgegriffen.

5.3.3 Fazit

Das logische Konzept für ein auf die Anforderungen eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs in der Intralogistik zugeschnittenes Kommunikationssystem basiert auf einem Agentensystem und einer Kombination aus direkter Peer-to-Peer-Kommunikation und dem Datenaustausch über ein Blackboardsystem. Das Blackboardsystem reduziert den Kommunikationsaufwand für die benötigte anlagennahe Informationsbereitstellung und ermöglicht einen strukturierten und sicheren Datenaustausch innerhalb des Systems sowie mit übergeordneten Systemen. Es kann beliebige Daten aufnehmen und bereitstellen und bietet Grundfunktionalitäten der Datenverwaltung (Zugriffssteuerung, Synchronisation, Benachrichtigungsmechanismus). Blackboard-Agenten enthalten keine anwendungsspezifische Logik und sind daher nicht auf spezielle Aufgabenbereiche beschränkt. Durch den eingeführten Parallelbetrieb mehrerer verteilter Blackboards (Distributed Blackboard System) wird eine gesteigerte Leistungsfähigkeit und Skalierbarkeit sowie eine erhöhte Robustheit des Kommunikationssystems erreicht.

5.4 Gesamtkonzept für die Kommunikation in selbststeuernden Fahrzeugkollektiven

Das Kommunikationskonzept basiert – dem Internet-der-Dinge-Paradigma (vgl. Abschnitt 2.2.3) folgend – auf Softwareagenten, welche die Koordination und Kooperation im Fahrzeugkollektiv übernehmen. Jedes Flurförderzeug ist durch einen Softwareagenten repräsentiert, der den Fahrzeugstatus überwacht, sich an Auftragsverhandlungen beteiligt und die Steuerung beeinflusst. Abhängig vom Umsetzungsgrad einer funktionsorientierten Modularisierung (vgl. Abschnitt 2.2.2) bzw. der Verortung der Softwareagenten lassen sich zwei Ausprägungsstufen des Konzepts unterscheiden, welche in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

5.4.1 Verortung des Agentensystems auf zentralem Server

Bei einer Verortung der Softwareagenten auf einem zentralen Server oder in einem Server-Cluster erfolgt eine räumliche Trennung zwischen Agent und von ihm repräsentiertem Flurförderzeug. Die einzelnen Module kapseln somit nicht ihre komplette Steuerungslogik, was einem der Grundsätze einer funktionsorientierten Modularisierung (Abschnitt 2.2.2) widerspricht. Obwohl in diesem Fall weiterhin eine Art Leitsteuerung auf einer zentralen Rechnerplattform existiert, birgt dieser Ansatz doch Vorteile gegenüber herkömmlichen, streng hierarchischen Steuerungsorganisation. Die Steuerungslogik lässt sich durch die Aufteilung eines komplexen Optimierungsproblems in mehrere Teilprobleme vereinfachen. Zusätzlich verbessert sich die Reaktionsfähigkeit auf dynamische Umweltbedingungen [Sch-2010b].

Die Softwaredienste (z.B. Auftragsverwaltung, Visualisierungsdienst), die neben den Modul-Agenten ein weiterer Bestandteil des Agentensystems sind, sind ebenfalls auf dem Server bzw. Server-Cluster verortet. Dadurch können alle Softwareagenten in der gleichen Laufzeitumgebung interagieren. Die Übertragungszeiten von Datenpaketen sind daher geringer als in einem Netzwerk mit verteilten Teilnehmern (vgl. [Lib-2011, S. 145]). Dies erleichtert den Austausch komplexer Nachrichten im XML-Format.

Eine spezielle Ausprägung dieser Softwaredienste sind Blackboard-Agenten, deren Dienstleistung die Unterstützung und Bündelung der Agentenkommunikation darstellt. Zum Einsatz kommt ein verteiltes Blackboardsystem, wie es im Rahmen dieser Arbeit konzeptioniert und in Abschnitt 5.3 vorgestellt wird. Die Blackboard-

Agenten sorgen nötigenfalls für eine Anbindung an Datenbanksysteme übergeordneter Ebenen (z.B. Lagerverwaltungssystem).

Aufgaben mit erhöhtem Koordinationsaufwand (z.B. Auftragsverhandlungen, Routenplanung) löst das Agentensystem auf dem Server. Es müssen daher lediglich Daten, die von den Steuerungen (SPS) der einzelnen Fahrzeuge benötigt werden, drahtlos über einen der in Abschnitt 5.2.1 gewählten Funkstandards (WLAN, Bluetooth, ZigBee) an die Zielpunkte übermittelt werden. Jeder Modul-Agent leitet Fahr-, Lastwechsel- und Transportaufträge nach einer erfolgreichen Auktion direkt an das von ihm repräsentierte Flurförderzeug weiter. Die entsprechenden Datensätze können als komprimierter Binärcode gesendet werden, um das zu übertragende Datenvolumen zu verringern. Dies gilt ebenso für von der Fahrzeugsteuerung gesendete Vollzugs-, Status- oder Fehlermeldungen, die an den zugeordneten Softwareagenten adressiert sind und von diesem interpretiert und verarbeitet werden. Das Zusammenspiel aus Sensorik und Steuerung der Transportroboter sorgt für eine selbstständige Navigation und Kollisionsvermeidung und ermöglicht somit eine autonome Auftragsbearbeitung ohne weitere Informationen vom Agentensystem. Das drahtlos zu übermittelnde Datenvolumen zwischen dem Server des Agentensystems und den Einzelfahrzeugen steigt im Vergleich zu einer hierarchischen Steuerungsorganisation, da die autonome Wegfindung und selbstständige Auftragserfüllung durch die einzelnen Transportroboter eine erhöhte Informationsdichte auf Ebene der Fahrzeugsteuerung erfordert.

5.4.2 Verortung der Softwareagenten auf autonomen Flurförderzeugen

Die Realisierung eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs mit einem Höchstmaß an Autonomie erfordert eine Verortung der Softwareagenten auf den autonomen Flurförderzeugen. Mit dieser verteilten Steuerungsorganisation erfüllen die Fördertechnikmodule in ihrer Ausprägung als mobile Transportroboter die Vorgaben einer funktionsorientierten Modularisierung, indem sie alle zur Erfüllung einer (logistischen) Funktion benötigten Komponenten (Mechanik, Energie, Steuerung, vgl. [Wil-2006]) in sich vereinen.

Eine Verortung des Softwareagenten auf den Fahrzeugen erfordert i.d.R. den Einsatz von leistungsstarken Rechnerplattformen wie beispielsweise Embedded-PCs. Die aktuelle Forschung im Bereich der Automatisierungstechnik sucht nach Wegen, Softwareagenten komplett in Programmiersprachen nach IEC 61131-3 abzubilden,

5.4 Gesamtkonzept für die Kommunikation in selbststeuernden Fahrzeugkollektiven

sodass diese auf herkömmlichen, echtzeitfähigen SPSen lauffähig sind [Wan-2008; Wan-2010].

Das in dieser Arbeit formulierte Kommunikationskonzept sieht den Einsatz von Embedded-PCs mit Soft-SPS vor. Damit orientiert sich das Konzept an einer erfolgreichen Umsetzung einer dezentralen, auf Softwareagenten basierenden Materialflusssteuerung für eine Elektrohängebahnanlage in den Arbeiten von Chisu [Chi-2010] und Kuzmany [Kuz-2010]. Die Modulsteuerung erfolgt mittels einer Zwei-Schicht-Architektur, in der die strategische Steuerung in einer anderen Laufzeitumgebung erfolgt als operative Steuerung und Sicherheitssteuerung.

Im Rahmen dieser Zwei-Schicht-Architektur bilden Softwareagenten die strategische Steuerungsebene ab. Da ihre Aufgaben nicht sicherheits- oder echtzeitrelevant sind, nutzen die Agenten das nicht echtzeitfähige PC-Betriebssystem des Embedded-PCs als Laufzeitumgebung. Dies erlaubt die übliche Programmierung der Softwareagenten in Hochsprachen (z.B. Java, C#). Die Programme der Maschinensteuerungsebene, welche die operative Steuerung und die Sicherheitssteuerung umfasst, laufen auf der echtzeitfähigen Soft-SPS des Embedded-PCs und sind in IEC-61131-Programmiersprachen implementiert. Der Datenaustausch zwischen strategischer Steuerungsebene und Maschinensteuerungsebene erfolgt über eine Middleware (Vermittlungsschicht), die das Schreiben und Lesen von Variablen mit verschiedenen Datentypen ermöglicht [Chi-2010, S. 31].

Die Kommunikation auf der Ebene der Maschinensteuerung erfolgt ausschließlich fahrzeugintern (vgl. Abschnitt 5.1.2) über die Ein- und Ausgänge der Soft-SPS und ein Feldbussystem. Die Softwareagenten der strategischen Steuerungsebene stellen neben der Kommunikation mit der Maschinensteuerungsebene via Middleware auch den Informationsaustausch mit anderen Agenten (Modul-Agenten, Softwaredienste, Blackboard) sicher. Für diese externe Kommunikation ist eine Kombination aus direkter Nachrichtenübermittlung (Message-Passing) nach dem Peer-to-Peer-Prinzip und der indirekten Kommunikation unter Nutzung eines Blackboardsystems vorgesehen. Dieser hybride Ansatz reduziert die Kommunikationslast im gesamten Kommunikationssystem. Die Zuordnung des Kommunikationswegs erfolgt in Abhängigkeit von der zu übermittelnden Informationsart. So werden Daten, welche nur für wenige Teilnehmer relevant sind oder den Empfänger schnellstmöglich erreichen müssen, direkt ausgetauscht (z.B. Lastwechselkoordination), während Daten, die von

vielen Teilnehmern benötigt werden (z.B. Auftragsdaten) auf ein Blackboard geschrieben werden.

Die technische Umsetzung des Kommunikationssystems nutzt die in Abschnitt 5.2 ermittelten Funkstandards und Datenformate. Das technische Kommunikationskonzept ermöglicht eine schnelle und sichere Datenübertragung zwischen den räumlich verteilten und mobilen Kommunikationspartnern eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs. Abbildung 5-12 fasst das vorgestellte Kommunikationskonzept schematisch zusammen.

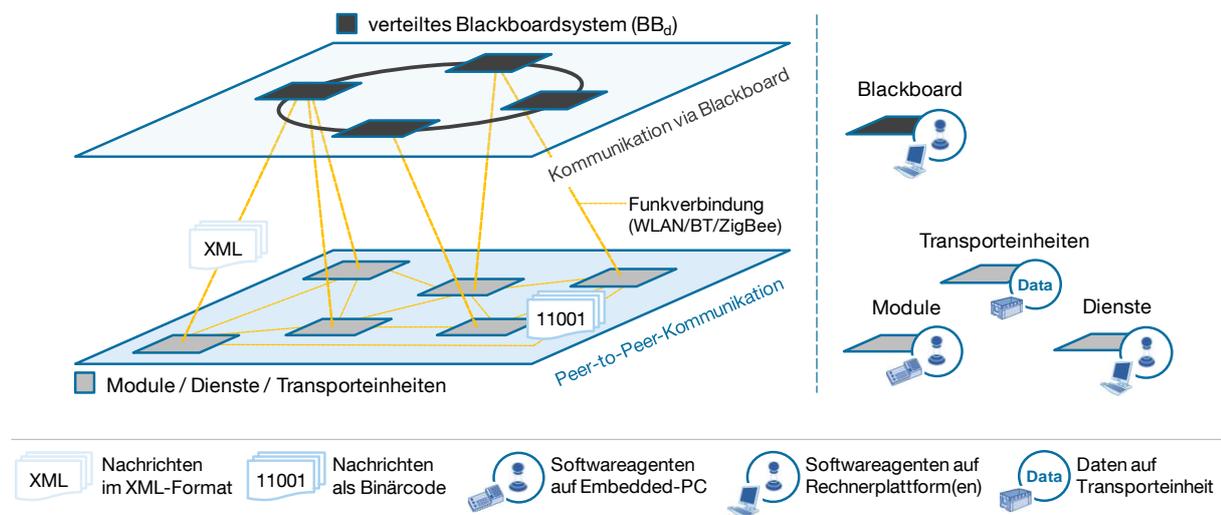


Abbildung 5-12: Kommunikationskonzept für selbststeuernde Fahrzeugkollektive in der Intralogistik

Die konsequente Umsetzung des Internet-der-Dinge-Paradigmas sieht als dritte Grundeinheit neben (Fördertechnik-)Modulen und Softwarediensten speziell ausgestattete Transporteinheiten (TE) vor, die Informationen zu ihrer Geschäftslogik bzw. zu ihrem Workflow innerhalb eines Materialflusssystems mit sich führen und selbstständig verwalten (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die benötigten Informationen können beispielsweise auf einem RFID-Tag gespeichert und bei Bedarf ausgelesen oder verändert werden. Zudem lassen sich auch den Transporteinheiten Softwareagenten zuordnen. Diese werden i.d.R. nicht an der Transporteinheit verortet, da die benötigten Ressourcen (hohe Speicherkapazität und Rechenleistung) dort nicht verfügbar sind [Gün-2010a, S. 117f]. Daher laufen die Softwareagenten auf einem Server und werden immer dann aktiv, wenn die mit ihnen verknüpfte Transporteinheit einen Identifikationspunkt (I-Punkt) passiert. Wird das Ziel eines Workflowschritts erfolgreich erreicht, sorgt der TE-Agent dafür, dass das nächste Ziel auf dem RFID-Transponder hinterlegt wird.

Für den Betrieb eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs eröffnet der Einsatz spezieller Transporteinheiten, die ihre Zielpunkte und weitere Parameter (z.B. Prioritäten, Sequenzvorgaben) mit sich führen, die Möglichkeit zu einer Steigerung der Autonomie. Mittels entsprechender Lesegeräte an den Fahrzeugen kann ein direkter Datenaustausch mit den Transporteinheiten erfolgen. Durch diesen direkten Datenaustausch können die Modul-Agenten selbstständig und unabhängig von Softwarediensten oder übergeordneten Systemen Transportaufträge ableiten. Ein Datenaustausch mit übergeordneten Ebenen ist unter diesen Umständen lediglich für Visualisierungs- und Protokollierungsdaten notwendig und erfolgt über Zugriffe auf das Blackboardsystem (vgl. Abschnitt 5.3.1, *Schnittstellenfunktion zu übergeordneten Systemen*).

5.5 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wird ausgehend von einer detaillierten Anforderungsanalyse ein Konzept für die Kommunikation in einem Fahrzeugverbund aus selbststeuernden Flurförderzeugen entwickelt. Für die technische Umsetzung des Kommunikationskonzepts werden die drahtlosen Basistechnologien WLAN (IEEE 802.11), Bluetooth (IEEE 802.15.1) und ZigBee (IEEE 802.15.4) als geeignet bewertet. Für die Datenübertragung kommen in Abhängigkeit von Datenstruktur (Datenmenge, Komplexität) und zeitlichen Vorgaben zwei alternative Datenformate zum Einsatz. Das Konzept umfasst darüber hinaus eine logische Systemarchitektur, die auf einer Mischform aus direkter Peer-to-Peer-Kommunikation und einem indirekten Datenaustausch über die Informationsknotenpunkte eines Blackboardsystems basiert. Ausgehend von der Implementierung eines einzelnen Blackboards (BB_1) wird ein verteiltes Blackboardsystem (Distributed Blackboard System, BB_d) entwickelt, um eine hohe Robustheit gegenüber Störungen sowie eine gute Skalierbarkeit des Kommunikationssystems zu garantieren.

Abschließend werden zwei Ausprägungen des Kommunikationskonzepts vorgestellt, welche sich in der Verortung der steuernden Softwareagenten und somit im Dezentralisierungsgrad der Materialflusssteuerung unterscheiden. Dies beeinflusst die technische Umsetzung der beiden Konzeptvarianten und deren Grad an Wandelbarkeit. Die zweite Ausprägung des Konzepts kann als Weiterentwicklung der ersten Konzeptvariante verstanden werden. Folglich zeigen die beiden Varianten eine mögliche Vorgehensweise für eine Umsetzung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten

Kommunikationskonzepts in eine praktische Anwendung auf, bei welcher der Dezentralisierungsgrad der Systemsteuerung schrittweise erhöht wird. Auf diese Weise kann zunächst die grundlegende Funktionsweise eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs sowie des zugehörigen Agentensystems sichergestellt werden, ehe es in einer zweiten Entwicklungsstufe Fragestellungen wie die Ad-hoc-Vernetzung der Flurförderzeuge oder die Unterstützung der Schwarmintelligenz innerhalb des Fahrzeugkollektivs zu klären gilt. Anhand einer agentenbasierten Simulationsumgebung und einer analytischen Vergleichsrechnung wird das Konzept im folgenden Abschnitt validiert.

6 Realisierung und Validierung des logischen Kommunikationskonzepts

Das entwickelte Kommunikationskonzept für selbststeuernde Fahrzeugkollektive in der Intralogistik basiert auf einer drahtlosen Datenübertragung mittels standardisierter Funktechnologien und einem hybriden Kommunikationsmodell, das sowohl einen direkten Nachrichtenaustausch zwischen Sender und Empfänger als auch die Nutzung eines Blackboardsystems zur Informationsbeschaffung und -verteilung erlaubt. Um den zentralen Charakter des Blackboardsystems, der mit einem erhöhten Ausfallrisiko einhergeht, aufzulösen, wird dieses in verteilte, untereinander logisch verknüpfte Informationsknotenpunkte überführt (Abschnitt 6.1). Die Funktionsweise und die Robustheit des entstandenen verteilten Blackboardsystems wird in einer regelbasierten Testumgebung validiert (Abschnitt 6.2). Anschließend wird anhand einer analytischen Vergleichsrechnung die Kommunikationslast eines Blackboardsystems jener in Peer-to-Peer-Systemen gegenübergestellt (Abschnitt 6.3). Das Kapitel schließt mit einer Bewertung der aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse (Abschnitt 6.4).

6.1 Implementierung eines verteilten Blackboardsystems

Die einzelnen Blackboards des verteilten Blackboardsystems (BB_d) werden als FIPA-Agenten [FIPA-2009] ausgeführt, greifen auf Bibliotheken des Java Agent Development (JADE) Frameworks [Bel-2007; JADE] zu und können in FIPA-konforme Agentensysteme migriert werden. Damit genügt die Implementierung den Vorgaben aus dem Internet der Dinge in der Intralogistik [Gün-2010a] (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die Agentenkommunikation nutzt folgende FIPA-Interaktionsprotolle:

- QUERY: Informationsabfrage durch den Sender
- REQUEST: Beauftragung einer Aktion auf Empfängerseite
- INFORM: Informieren des Empfängers
- SUBSCRIBE: Anmeldung für ein Nachrichtenabonnement
- CFP (Call for Proposal): Anforderung von Geboten bezüglich einer Aktion

Diese Interaktionsprotolle legen lediglich die Struktur fest, der eine an einen andern Agenten übermittelte Nachricht entsprechen muss, jedoch nicht deren Inhalte. Die Inhalte werden im XML-Format übertragen. Das Blackboardsystem greift auf einen MSSQL-Server zu und kann mittels entsprechender SQL-Abfragen Daten, die nach Beendigung des Blackboardsystems weiter benötigt werden (z.B. letzte bekannte Fahrzeugposition), in einer Datenbank speichern und von dieser abrufen. Das verteilte Blackboardsystem verfügt über eine grafische Oberfläche, um dem Nutzer einen Überblick über die angemeldeten Softwareagenten und die momentane Kommunikation auf dem Blackboard zu verschaffen (Abbildung 6-1). Ausführungsplattform ist ein handelsüblicher Office-PC mit MS Windows XP als Betriebssystem. Bei einer Aufteilung einer JADE-Plattform auf mehrere Container mit jeweils einem oder mehreren Blackboards und einer Verteilung der Container auf verschiedene Rechner ist zu berücksichtigen, dass die Zeit für eine rechnerübergreifende Datenübertragung bei gleicher Systemgröße stark ansteigt⁶⁴.

Die in Abbildung 6-1 ebenfalls erkennbare Visualisierungsumgebung ist nicht Bestandteil des verteilten Blackboardsystems, sondern ein eigenständiger Softwaredienst, der Positions- und Statusdaten der Blackboards regelbasiert in eine Darstellung des Systemverhaltens und -zustands überführt [Chi-2010, S. 120ff]. Zu diesem Zweck ist der Visualisierungsagent bei sämtlichen Blackboards registriert und verfügt dort über Abonnements aller für ihn relevanten Daten. Das hinterlegte Layout stammt aus einer XML-formatierten Konfigurationsdatei⁶⁵ und stellt Schienen, Weichen und Krane einer Elektrohängebahnanlage dar, die im nächsten Abschnitt zur Untersuchung des Kommunikationsverhaltens Verwendung findet.

⁶⁴ Durch eine Verteilung der JADE-Plattform auf zwei Rechner entsteht ein Anstieg des Zeitbedarfs für den Nachrichtenaustausch um etwa den Faktor 12 [Cor-2012].

⁶⁵ Layoutdaten können alternativ auf dem Blackboard hinterlegt werden.

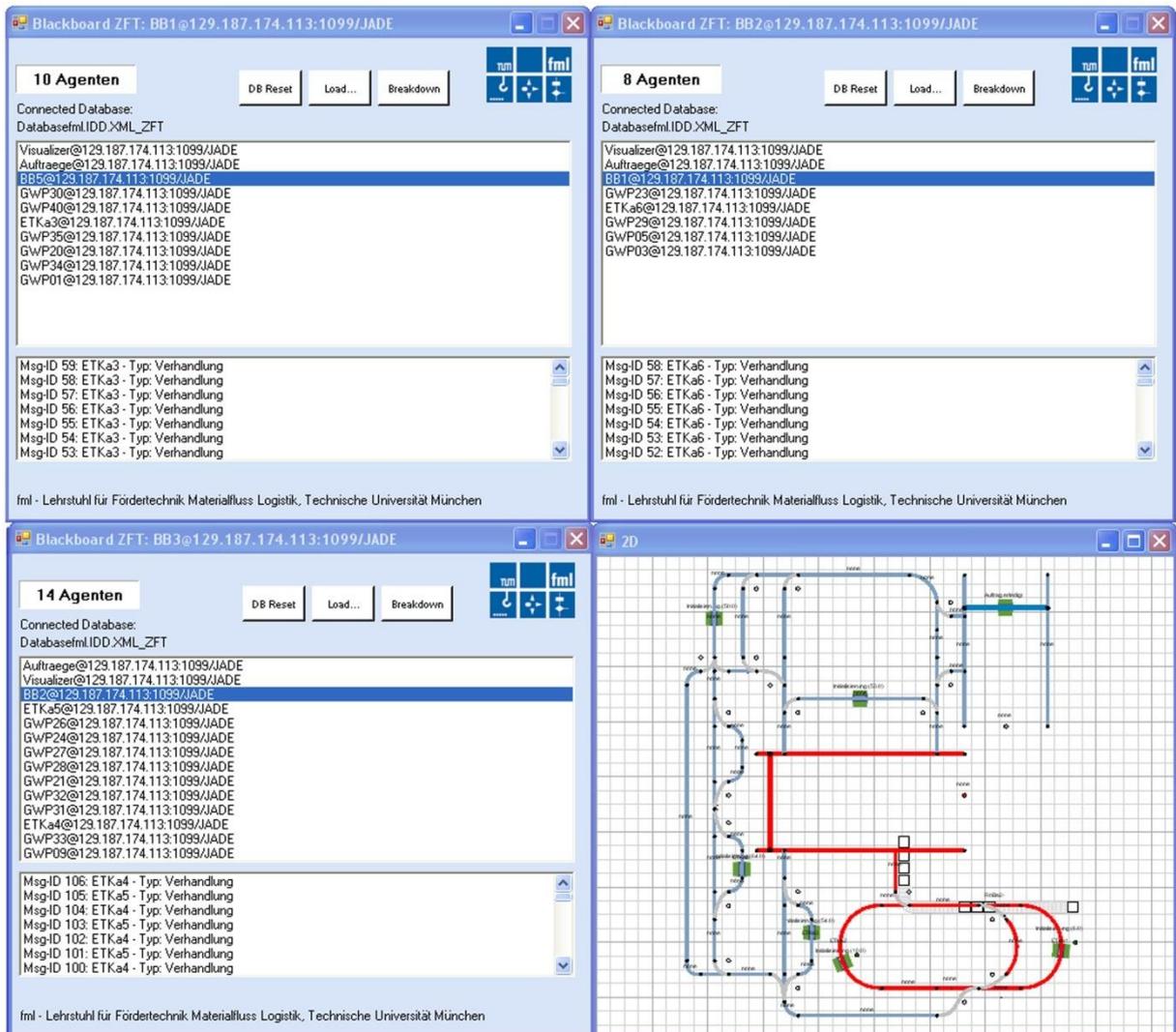


Abbildung 6-1: Grafische Oberfläche des verteilten Blackboardsystems (BB_n) bestehend aus drei Informationsknotenpunkten und der 2D-Visualisierung der EHB-Anlage

6.2 Analyse des Kommunikationsverhaltens

Zur Validierung der Funktionsweise eines verteilten Blackboardsystems wird eine von Softwareagenten gesteuerte Elektrohängebahnanlage [Chi-2010, S. 144ff; Kuz-2010, S. 137ff; Gün-2010a] genutzt, deren Aufbau und Funktionsweise in Abschnitt 4.4.1 bereits näher beschrieben ist. Das System verfügt neben Modul-Agenten für EHB-Katzen, -Krane und -Weichen über Softwaredienste wie eine Visualisierungs-umgebung (vgl. Abbildung 6-1), einen Auftragsmanager/-generator und einen Editor. Zudem steht zu jedem der real vorhandenen Fördertechnikmodule (zwei EHB-Katzen, drei Weichen, ein Kran) eine emulierte Version der Maschinensteuerung zur Verfügung, die für eine realitätsnahe Simulation des Anlagenverhaltens genutzt werden kann [Ten-2012]. Für die Umsetzung und Untersuchung des in Abschnitt 5.3

vorgestellten logischen Modells eines verteilten Blackboardsystems ist das Szenario daher gut geeignet. Um das System komplexer zu gestalten und den Modul-Agenten einen größeren Entscheidungsraum zu bieten, wird das reale Layout um virtuelle Elemente (EHB-Katzen, Weichen, Kran) erweitert (vgl. Abschnitt 4.4.1, Abbildung 4-9). Die Softwareagenten von realen und virtuellen Fördertechnikmodulen sind identisch und unterscheiden sich lediglich in ihrer Agent-ID und ihrer Benennung.

Anhand von Simulationsläufen in Form der Abarbeitung einzelner Transportaufträge und von Auftragslisten in dieser Umgebung kann gezeigt werden, dass das verteilte Blackboardsystem die im restlichen Agentensystem benötigten Daten zuverlässig und schnell zur Verfügung stellt. Es sind in den simulierten Prozessen keinerlei störende Verzögerungen aufgrund verspätet eintreffender Nachrichten zu beobachten. Beim Ausfall eines Blackboards, der durch das Drücken eines Buttons (`Breakdown`) auf der grafischen Oberfläche der Blackboards herbeigeführt werden kann, sorgt ein anderes Blackboard, welches das ausgefallene Blackboard überwacht, dafür, dass dieses vom Agent Management System wieder gestartet wird. Damit folgt die Fehlerbehandlung einem der in Abschnitt 5.3.2 vorgestellten Konzepte (vgl. Abbildung 5-10). Das Blackboardsystem hat somit die angestrebte Robustheitssteigerung erfahren.

Auch die ebenfalls in Abschnitt 5.3.2 angeregte räumliche Spezialisierung der verteilten Blackboards zur verbesserten Lastverteilung innerhalb eines verteilten Blackboardsystems wird anhand der Simulation und Emulation einer agentengesteuerten Elektrohängebahn umgesetzt (Abbildung 6-2). In diesem Untersuchungsszenario melden sich die Modul-Agenten der EHB-Katzen in Abhängigkeit ihrer aktuellen Position bei einem für den entsprechenden Bereich zuständigen Blackboard an. Bei Einfahrt in eine andere Zone melden sie sich zunächst beim dort zuständigen Blackboard an. Nach erfolgreicher Registrierung melden sie sich beim ersten Blackboard ab. Das aktuell zuständige Blackboard teilt dem Modul-Agenten der EHB-Katze mit, wann sie eine Zone verlassen hat und nach einem neuen Blackboard suchen muss. Zu diesem Zweck verwaltet jedes Blackboard eine Tabelle der Wegpunkte, die seinem Zuständigkeitsbereich angehören. Meldet der Modul-Agent der EHB-Katze eine aktuelle Position, die sich nicht in der Tabelle befindet, führt dies automatisch zu einer Hinweismeldung an den Modul-Agenten. Dieser startet eine Suche nach verfügbaren Blackboard-Agenten und fügt der Suchanfrage seine Position bei. Anhand dieser Position können die Blackboards wiederum über

einen Abgleich mit ihren internen Wegpunktstabellen ermitteln, ob sich die EHB-Katze in ihrem Zuständigkeitsbereich befindet. Das entsprechende Blackboard sendet dem Modul-Agenten als Antwort auf seine Anfrage die Aufforderung zur Registrierung.

Die räumliche Spezialisierung einzelner Blackboards konnte sich jedoch in ersten Tests nicht bewähren, da sie zu einer ungleichmäßigen Auslastung der einzelnen Blackboards führt und das Risiko von unvorhergesehen auftretenden Spitzenlasten für einzelne Blackboards in sich trägt. Dies lässt sich anhand von Abbildung 6-2 verdeutlichen.

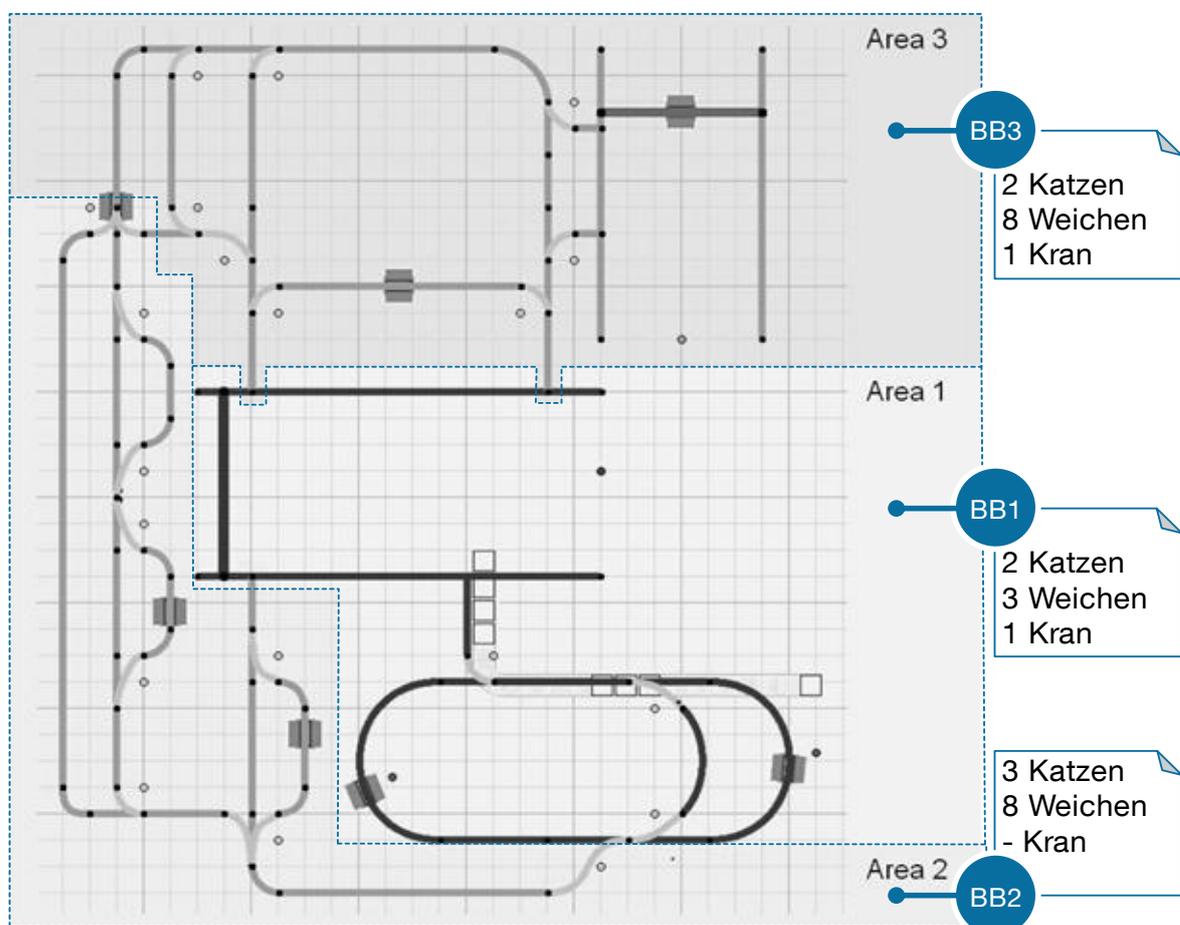


Abbildung 6-2: Bereichsweise Blackboard-Zuordnung am Beispiel einer EHB-Anlage

Treten aufgrund der aktuellen Auftragslage alle sieben EHB-Katzen auf den dunkelgrau gekennzeichneten Streckenabschnitten (*Area 1*) ein und melden sich beim zuständigen Blackboard **BB1** an, so muss dieses nahezu den kompletten Datenaustausch im System bewerkstelligen. Dieses Beispiel macht deutlich, dass die Spezialisierung der Blackboards auf beschränkte Zuständigkeitsbereiche bei einer räumlich

begrenzten Überlast eine Umverteilung auf weniger ausgelastete Blackboards verhindert. Eine komplette, lastabhängige Verteilung der Daten auf Basis von Zugriffs- und Auslastungsstatistiken der einzelnen Blackboards (adaptive Lastverteilung) ist aufgrund dieser Erkenntnisse einer räumlichen und wie in Abschnitt 5.3.2 festgestellt auch einer funktionalen Spezialisierung vorzuziehen. Diese Schlussfolgerung sowie die positiven Ergebnisse des Funktionstests des verteilten Blackboardsystems sind auf die Blackboard-basierte Kommunikation in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv in der Intralogistik übertragbar.

6.3 Analytische Vergleichsrechnung

In diesem Abschnitt soll anhand einer analytischen Vergleichsrechnung aufgezeigt werden, wie sich der Einsatz unterschiedlicher logischer Kommunikationsmodelle auf die Kommunikationslast in einem selbststeuernden Fahrzeugkollektiv auswirkt. Gegenübergestellt werden gemäß des in Abschnitt 5.3 festgelegten logischen Konzepts die Verwendung des Abonnement-basierten Push-Prinzips und des Pull-Prinzips (Anfrage/Antwort) sowie die direkte Peer-to-Peer- und die indirekte Blackboard-Kommunikation. Der gewählte analytische Ansatz ist im Vergleich zu einer Simulation oder einer Messung im realen System als grob einzustufen. Allerdings sind die Ergebnisse gerade dadurch gut auf verschiedene Einsatzszenarien für selbststeuernde Fahrzeugkollektive übertragbar. Die Berechnung der im System auszutauschenden Nachrichten erfolgt nach den in Tabelle 6-1 aufgeführten Formeln⁶⁶.

Tabelle 6-1: Formeln zur Berechnung des maximalen Nachrichtenaufkommens in Abhängigkeit vom angewandten Kommunikationsmodell (P2P/BB) und -prinzip (Push/Pull)

	Blackboardsystem (BB)	Peer-to-Peer (P2P)
Pull	$m = 3 n + 2 g$	$m = 2 n (k + g)$
Push	$m = 2 n + g$	$m = n (k + g)$

⁶⁶ Für die Herleitung der verwendeten Formeln wird an dieser Stelle auf die Arbeit von Chisu [Chisu 2010, S. 68ff] verwiesen.

Dabei ist die maximale Anzahl an Nachrichten m stets abhängig von der Anzahl der Entitäten n , die das Kommunikationssystem nutzen, und der durchschnittlichen Anzahl an Entitäten k , von welchen eine Entität bestimmte Informationen benötigt. Entitäten sind beispielsweise als Softwareagenten ausgeprägt und können sowohl als Informationslieferanten als auch als Informationsverbraucher fungieren. Entitäten, welche von allen Entitäten im System Informationen benötigen (z.B. *globale Datensammler* wie Visualisierungsdienste oder Datenlogger), stellen einen Sonderfall dar. Ihre Anzahl g hat starken Einfluss auf die Anzahl an Nachrichten im System. Globale Datensammler werden im Rahmen dieser Kommunikationsanalyse gesondert betrachtet, sodass sich die Gesamtanzahl an Entitäten N aus der Summe der kommunizierenden und der sammelnden Entitäten ergibt:

$$N = n + g \quad (6-1)$$

Abbildung 6-3 veranschaulicht den Kommunikationsverlauf anhand eines aus zehn Entitäten bestehenden Systems ohne globalen Datensammler ($g=0$; $N=n=10$). In diesem Kommunikationssystem benötigt jede Entität von (durchschnittlich) einer anderen Entität eine Information ($k=1$). Zur Vereinfachung wird angenommen, dass jede Entität für eine Nachbar-Entität als Informationsverbraucher und für eine andere Nachbar-Entität als Informationslieferant fungiert. Dieser Zusammenhang lässt sich bei der Darstellung der Peer-to-Peer-Kommunikation (P2P) gut erkennen⁶⁷. Bei der Kommunikation via Blackboard (BB) ist nicht nachvollziehbar, welche Entitäten untereinander Nachrichten austauschen. Daran lässt sich die angesprochene Entkopplung zwischen Sender und Empfänger in diesem Modell erkennen. Die Schlussfolgerung aus diesem Beispiel lautet, dass eine Peer-to-Peer-Kommunikation nach dem Push-Prinzip (Abonnement bei Nachbar-Entität) bei der gegebenen Systemgröße und dem geringen Informationsbedarf der Entitäten die Lösung mit der geringsten Kommunikationslast darstellt.

Diese Schlussfolgerung muss allerdings insofern eingeschränkt werden, als dass im Falle der Peer-to-Peer-Kommunikation sowohl nach dem in Abbildung 6-3 dargestellten gezielten Pull-Prinzip (Unicast) als auch für das Push-Prinzip (einmaliges Abschließen eines Nachrichten-Abonnements) der jeweilige Gesprächspartner zunächst ermittelt werden muss. Dieses Auffinden der Kommunikationspartner kann

⁶⁷ Nicht dargestellt ist ein Fluten des Systems (Broadcast), um an eine Information zu gelangen.

durch einen Broadcast oder durch die Nutzung eines Discovery-Services erfolgen und erhöht die Nachrichtenmenge, die zum Beschaffen einer Information benötigt wird. Dieser Mehraufwand entfällt bei einem Blackboardsystem nach einer einmaligen Anmeldung an einem Blackboard. Lediglich der Abschluss von Nachrichten-Abonnements beim Blackboard ist mit einem zusätzlichen Nachrichtenaustausch verbunden.

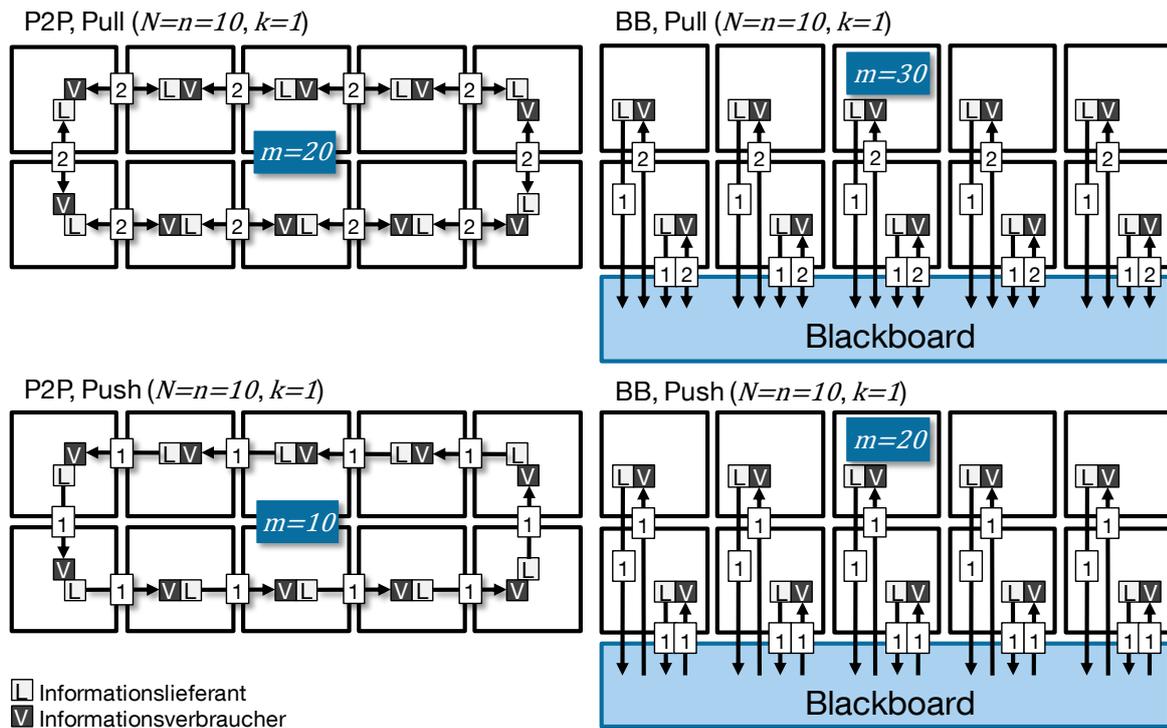


Abbildung 6-3: Anschauliche Darstellung der Unterschiede der vier möglichen Kommunikationsarten

In der folgenden Tabelle 6-2 werden die Parameter n und k variiert, um den Zusammenhang zwischen dem Informationsbedarf innerhalb eines Kommunikationssystems und der durch die verschiedenen Kommunikationsmodelle verursachten Kommunikationslast weiter zu verdeutlichen. Der Parameter $k=2$ zeigt dabei die Tendenz beim langsamen Anstieg des Informationsbedarfs auf, während die Parameter $k=6$ bzw. $k=30$ einem Informationsbedarf der Entitäten bei durchschnittlich jeweils 60 Prozent der anderen Entitäten im jeweiligen Szenario entsprechen (starke Vernetzung). Es wird deutlich, dass bei steigender Vernetzung und hohem Informationsbedarf das Blackboardsystem klar überlegen ist.

Tabelle 6-2: Kommunikationssystem ohne globale Datensammler ($N = n$)

		n	k	(g)	m	n	k	(g)	m
Pull / P2P	10	1			20	50	1		100
		2	-		40		2	-	200
		6			120		30		3.000
Pull / BB	10	1			30	50	1		150
		2	-				2	-	
		6					30		
Push / P2P	10	1			10	50	1		50
		2	-		20		2	-	100
		6			60		30		1.500
Push / BB	10	1			20	50	1		100
		2	-				2	-	
		6					30		

Verstärkt wird diese Tendenz, wenn im System zusätzlich zu den kommunizierenden Entitäten globale Datensammler eingesetzt werden. Da diese bei Verwendung eines Blackboardssystems im System einen einzigen Kommunikationspartner benötigen, um alle benötigten Daten zu erhalten, wirkt sich ihr Vorhandensein kaum auf die Kommunikationslast im System aus (Tabelle 6-3). Anders verhält es sich bei der Peer-to-Peer-Kommunikation, bei der die globalen Datensammler wesentlich mehr Nachrichten benötigen, um ihren Informationsbedarf zu decken.

Tabelle 6-3: Kommunikationssystem mit zwei globalen Datensammlern ($N = n + 2$)

		n	k	g	m	n	k	g	m
Pull / P2P	10	1			60	50	1		300
		2	2		80		2	2	400
		6			160		30		3.200
Pull / BB	10	1			34	50	1		154
		2	2				2	2	
		6					30		
Push / P2P	10	1			30	50	1		150
		2	2		40		2	2	200
		6			80		30		1.600
Push / BB	10	1			22	50	1		102
		2	2				2	2	
		6					30		

In einem verteilten Blackboardsystem erhöht sich die Anzahl der Nachrichten noch geringfügig durch einen zusätzlichen Informationsbedarf der Blackboards zur ge-

gegenseitigen Überwachung und/oder Synchronisation (vgl. Abschnitt 5.3.2). Dennoch ist ein verteiltes und daher robustes Blackboardsystem mit skalierbarer Leistungsfähigkeit aufgrund seiner komplexitätsreduzierenden Eigenschaften als sinnvolle Ergänzung zur Peer-to-Peer-Kommunikation in selbststeuernden Fahrzeugkollektiven zu bewerten.

6.4 Bewertung der Untersuchungsergebnisse

In den vorangegangenen Abschnitten wird die Umsetzbarkeit und Leistungsfähigkeit des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten logischen Kommunikationskonzepts für ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv erfolgreich validiert. Anhand einer regelbasierten Simulationsumgebung und einer analytischen Vergleichsrechnung wird die Eignung der gewählten Kommunikationsmodelle in Abhängigkeit von verschiedenen Rahmenbedingungen aufgezeigt.

Für flexible Ausgestaltungsmöglichkeiten eines anforderungsgerechten Kommunikationssystems sorgen alternative Datenformate (XML und Binärcode, vgl. Abschnitt 5.2.2), eine kombinierte Nutzung von Peer-to-Peer- und Blackboard-Kommunikation (vgl. Abschnitt 5.2.2) sowie eine Auswahl geeigneter Funkstandards (WLAN, Bluetooth, ZigBee, vgl. Abschnitt 5.2.1), welche allerdings nicht Gegenstand der Validierung sind. Auf Basis des Kommunikationskonzepts und der Untersuchungserkenntnisse können somit konkrete Kommunikationssysteme für Realisierungen selbststeuernder Fahrzeugkollektive in der Intralogistik gestaltet werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Eine zunehmende Produktindividualisierung bei gleichzeitig wachsenden Sortimenten sowie durch E-Commerce und Globalisierung geprägte Märkte steigern die Komplexität und Dynamik in Logistiksystemen. Diese gesteigerten Anforderungen betreffen insbesondere die Logistikknoten in Wertschöpfungs- und Distributionsnetzwerken mit ihren Aufgaben der auftragsgerechten Kommissionierung und Verteilung von Gütern und Waren. Dort äußern sich oben genannte Entwicklungen einerseits in wachsenden Artikelzahlen und andererseits in mitunter stark schwankenden und daher kaum prognostizierbaren Auftragseingängen. Dies führt zu einer Zuspitzung des Zielkonfliktes zwischen maximaler Lieferbereitschaft und minimalen Beständen.

Als Reaktion auf die sich ändernden Rahmenbedingungen zeichnet sich in der Intralogistik ein Trend hin zu stark modular aufgebauten und dezentral durch logistische Objekte gesteuerten Materialflusssystemen ab, die aufgrund ihrer Flexibilität und Reaktionsfähigkeit auf ungeplante Ereignisse angemessen reagieren können. Technische Systeme mit diesen Eigenschaften werden als wandelbar bezeichnet. Eine Ausstattung autonomer, sich selbst steuernder Fördertechnikmodule mit Mobilität und der Fähigkeit zur freien Navigation führt zu Fahrzeugkollektiven, die sich aus selbststeuernden Flurförderzeugen aggregieren und Transportaufgaben und weitere logistische Funktionen selbstständig erfüllen können.

Dabei weisen derartige selbststeuernde Fahrzeugkollektive ein Höchstmaß an Layoutflexibilität auf und sind in ihrer Leistungsfähigkeit durch das Hinzufügen und Entfernen von Fahrzeugen aufwandsarm skalierbar. Zudem lässt sich auf derartige Fahrzeugverbände aus der Natur das emergente Phänomen der Schwarmintelligenz übertragen, um durch Koordination und Kooperation der einzelnen Fahrzeuge höherwertige Funktionen abbilden zu können, ohne die funktionale Ausstattung auf Fahrzeugebene zu modifizieren. Derartige selbststeuernde Fahrzeugschwärme versprechen somit ein hohes Potenzial an Wandelbarkeit für intralogistische Prozesse.

Gerade der hohe Koordinationsaufwand bei einer gleichzeitig stark verteilten Steuerungslogik führt zu einer großen Bedeutung der Kommunikationsfähigkeit der einzel-

nen Fahrzeuge untereinander und mit anderen Akteuren in angrenzenden oder übergeordneten Systemen. Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung eines geeigneten Kommunikationskonzepts zur Unterstützung der Koordination und Kooperation autonomer Fahrzeuge in einem innerbetrieblichen Umfeld sowie für die datentechnische Anbindung des Fahrzeugkollektivs an weitere assoziierte Kommunikationspartner. Vor diesem Hintergrund werden zu Beginn dieser Arbeit folgende drei Fragestellungen formuliert:

1. Lassen sich Funktionen der Intralogistik durch ein aus mobilen Robotern bestehendes Fahrzeugkollektiv realisieren?
2. Welchen Informationsbedarf weisen die autonomen Flurförderzeuge auf?
3. Wie können die benötigten Daten effizient und sicher ausgetauscht werden?

Den Rahmen für den Verlauf der Untersuchung geben die Prozesse und Techniken der Anwendungsdomäne Intralogistik vor. Aktuelle Trends dieser Anwendungsdomäne werden ausgewertet und als Basis für die Entwicklung des Kommunikationskonzepts herangezogen. Als wichtiger Orientierungspunkt sind in diesem Zusammenhang Steuerungsmechanismen und Technologien (RFID, Agentensysteme) des Internet der Dinge in der Intralogistik zu nennen. Die Untersuchung bestehender bzw. sich in der Entwicklung befindlicher Kommunikationssysteme in vergleichbaren technischen Systemen auf Basis mobiler Einheiten (Fahrerlose Transportsysteme, Vehicular Ad-hoc Networks) schließen die Grundlagenbetrachtung ab.

Anschließend werden vor dem Hintergrund der ersten oben genannten Fragestellung die Einsatzmöglichkeiten selbststeuernder Fahrzeugkollektive in Prozessen der Intralogistik untersucht. Als Kernfunktion erbringen die autonomen Flurförderzeuge eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs Transporte logistischer Objekte von einer Quelle zu einer Senke. Weitere Funktionen entstehen entweder durch das koordinierte Zusammenspiel des Fahrzeugverbunds (Verteilen, Zusammenführen, Sequenzieren, Puffern) oder durch die Ausstattung der Fahrzeuge mit weiterer Sensorik und Aktorik (z.B. Prüfen, Handhaben, Ein-/Auslagern).

Zur Beantwortung der zweiten Fragestellung erfolgt eine Analyse der für die Steuerung der einzelnen Fahrzeuge und deren Koordination untereinander benötigten Daten. Eine anschließende Klassifizierung der relevanten Informationsarten nach den Kriterien Datenmenge, Zeitvorgaben, Anzahl der Zielpunkte und Bedarfshäufigkeit zeigt zwei Anforderungsschwerpunkte an das Kommunikationssystem auf. Einer-

seits muss das Kommunikationssystem in der Lage sein, Informationen mit geringer Datenmenge zuverlässig innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters zu übermitteln (Schaltaufträge, Status-/Fehlermeldungen, einfache Sensordaten, Lastwechselkoordination). Auf der anderen Seite stehen Informationen, die lediglich weichen Zeitvorgaben folgen müssen, jedoch sehr hohe Datenmengen und komplexe Strukturen aufweisen können (Topologie-/Layoutdaten, Transportauftragsdaten, Fahrauftragsdaten, Auftragsverhandlungen, Organisations-/Koordinationsdaten, Visualisierungsdaten).

Auf Basis dieser Datenanalyse und -klassifizierung und einem Katalog an technischen und wirtschaftlichen Anforderungen erfolgt die Entwicklung eines technischen sowie eines logischen Konzepts für ein auf den Bedarf selbststeuernder Fahrzeugkollektive in der Intralogistik zugeschnittenes Kommunikationssystem. Angestrebt wird somit die Beantwortung der dritten Fragestellung. Für die technische Umsetzung des Kommunikationskonzepts werden die drahtlosen Basistechnologien WLAN (IEEE 802.11), Bluetooth (IEEE 802.15.1) und ZigBee (IEEE 802.15.4) als geeignet bewertet. Für die Datenübertragung kommen in Abhängigkeit von Datenstruktur (Datenmenge, Komplexität) und zeitlichen Vorgaben zwei alternative Datenformate zum Einsatz. Das Konzept umfasst darüber hinaus eine logische Systemarchitektur, die auf einer Mischform aus direkter Peer-to-Peer-Kommunikation und einem indirekten Datenaustausch über die Informationsknotenpunkte eines Blackboardsystems basiert. Ausgehend von der Implementierung eines einzelnen Blackboards (BB₁) wird das Konzept eines verteilten Blackboardsystems (Distributed Blackboard System, BB_d) entwickelt, um eine hohe Robustheit gegenüber Störungen sowie eine gute Skalierbarkeit des Kommunikationssystems zu garantieren.

Es werden zwei Ausprägungen des Kommunikationskonzepts vorgestellt, welche sich in der Verortung der steuernden Softwareagenten und somit im Dezentralisierungsgrad der Materialflusssteuerung unterscheiden. Dies beeinflusst die technische Umsetzung der beiden Konzeptvarianten und deren Grad an Wandelbarkeit. Die zweite Ausprägung des Konzepts kann als Weiterentwicklung der ersten Konzeptvariante verstanden werden. Folglich zeigen die beiden Ausprägungen eine mögliche Vorgehensweise für eine Umsetzung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Kommunikationskonzepts in eine praktische Anwendung auf, bei welcher der Dezentralisierungsgrad der Systemsteuerung schrittweise erhöht wird. Auf diese Weise kann zunächst die grundlegende Funktionsweise eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs sowie des zugehörigen Agentensystems sichergestellt werden, ehe es in

einer zweiten Entwicklungsstufe Fragestellungen wie die Ad-hoc-Vernetzung der Flurförderzeuge oder die Unterstützung der Schwarmintelligenz innerhalb des Fahrzeugkollektivs zu klären gilt.

Abschließend wird die Umsetzbarkeit und Leistungsfähigkeit des logischen Kommunikationskonzepts für ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv anhand einer regelbasierten Simulationsumgebung und einer analytischen Vergleichsrechnung validiert. Auf Basis des entwickelten Kommunikationskonzepts und der Erkenntnisse dieser Arbeit können zukünftig Kommunikationssysteme für selbststeuernde Fahrzeugkollektive im industriellen Einsatz gestaltet werden.

7.2 Ausblick

Das in dieser Arbeit entwickelte Kommunikationssystem für autonome, mobile Fördertechnikmodule stellt einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Umsetzung selbststeuernder Fahrzeugkollektive in der Intralogistik dar. Auf dem Weg zu derartigen Materialflusssystemen auf Basis mobiler Roboter sind allerdings noch weitere offene Fragestellungen zu klären. So müssen Kommunikationstests unter Realbedingungen durchgeführt werden, aus welchen sich detaillierte Erkenntnisse hinsichtlich der Zuverlässigkeit und der Leistungsfähigkeit des entwickelten Kommunikationssystems ableiten lassen. Speziell für das verteilte Blackboardsystem können weitere Tests Aufschluss über die Performanz und die Robustheit geben. Erste Versuchsreihen erfolgen im Rahmen dieser Arbeit rein softwarebasiert. Diese müssen durch weitere Testreihen ergänzt und schließlich ebenfalls unter Realbedingungen durchgeführt werden, um das reale Zeitverhalten innerhalb eines Fahrzeugkollektivs hinreichend zu berücksichtigen.

Zur Bewertung des Zeitverhaltens, der Zuverlässigkeit und der Störanfälligkeit des in Abschnitt 5.2 vorgestellten technischen Konzepts auf Basis von Funktechnologien (WLAN, Bluetooth, ZigBee) sind ergänzende Testreihen unter Realbedingungen nötig. Für diese Testreihen müssen die Modul-Agenten auf verteilten Hardware-Plattformen laufen, welche ausschließlich über ein Funknetzwerk gemäß der Vorgaben des technischen Konzepts (vgl. Abschnitt 5.2) untereinander und mit den Plattformen anderer Entitäten (z.B. verteiltes Blackboardsystem) verbunden sind. Um das Systemverhalten realitätsnah abzubilden, muss ein Auftragsgenerator existieren und die Plattformen der Modul-Agenten müssen mit Mobilität ausgestattet werden (z.B.

indem sie auf ferngesteuerten Modellfahrzeugen befestigt werden). Das Systemverhalten und die Agentenkommunikation können mit existierenden Softwarediensten (Blackboardsystem, Visualisierung) nachvollzogen und ausgewertet werden.

Um die skalierbare Leistungsfähigkeit eines verteilten Blackboardsystems bestmöglich zu nutzen, bietet sich eine adaptive Lastverteilung innerhalb des Blackboardsystems in Abhängigkeit von Zugriffs- und Auslastungsstatistiken der einzelnen Informationsknotenpunkte an. Zu diesem Zweck sind entweder entsprechende Anpassungen an den Blackboard-Agenten vorzunehmen oder zusätzliche Softwaredienste zu implementieren, welche die gleichmäßige Lastverteilung im Blackboardsystem koordinieren. Auf dem Weg zu selbststeuernden Fahrzeugkollektiven, die ohne die Unterstützung peripherer Einrichtungen ihre logischen Aufgaben erfüllen können, kann eine Verteilung der einzelnen Blackboards auf die Rechnerplattformen (z.B. Embedded-PC) der autonomen Flurförderzeuge zielführend sein. Dadurch würde jedoch i.d.R. keine Datenbank für eine Sicherung der Daten zur Verfügung stehen. Aus dieser Beschränkung für die Informationsqualität hinsichtlich Verfügbarkeit und Konsistenz lässt sich eine Anforderung an zukünftige Steuerungsalgorithmen ableiten. Diese müssen auch bei fehlenden oder unsicheren Informationen die Handlungsfähigkeit der Transportroboter aufrecht erhalten.

Wie in Abschnitt 5.2.1 festgestellt, gibt es keinen perfekt auf die Anforderungen eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs in der Intralogistik abgestimmten Funkstandard. Weiterentwicklungen im Bereich der Funktechnologien (z.B. IEEE 802.11r/s, 6LoWPAN) können jedoch die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit des drahtlosen Kommunikationsnetzwerks positiv beeinflussen. Von Interesse sind offene Standards, die einen schnellen Verbindungsaufbau (< 100 ms) erlauben, eine hohe Datenrate und Zuverlässigkeit aufweisen und die spontane Vernetzung von Funkknoten unterstützen. Auf diese Weise könnten sich die Fahrzeuge zu einem Ad-hoc-Netzwerk zusammenschließen, das sich selbst verwaltet.

Erweitert man den Fokus um allgemeine Fragestellungen selbststeuernder Fahrzeugkollektive in der Intralogistik, so ergeben sich weitere zukünftige Forschungsinhalte. Optimierte und lernfähige Steuerungsalgorithmen [Hei-2011], die Implementierung und Bewertung von Schwarmintelligenz [Grä-2009], Varianten des mechatronischen Fahrzeugaufbaus (heterogene Fahrzeugkollektive) sowie geeignete Berechnungs- und Bewertungsmethoden für die Leistungsfähigkeit [May-2010] und Wirtschaftlichkeit [Nop-2011] eines selbststeuernden Fahrzeugkollektivs im Ver-

gleich zu herkömmlichen Systemen stellen in diesem Zusammenhang exemplarische Fragestellungen dar.

Mit der Erforschung und Entwicklung autonomer mobiler Roboter und deren Kooperationsfähigkeit in Schwärmen sind jedoch nicht nur technische Herausforderungen verbunden. Das autonome Roboterverhalten kann für den Anwender, der den Roboter nutzen oder mit diesem kooperieren soll, ungewohnt und intransparent erscheinen und zu einer ablehnenden Haltung führen [Mar-2012]. Für den Nutzer ist oftmals nicht nachvollziehbar, welchen Schritt der Roboter als nächsten ausführt und auf welchen internen Zuständen und Regeln diese Entscheidung beruht. Dieser Skepsis kann auf zweierlei Arten begegnet werden. Entweder wird die Ausstattung des Roboters mit Künstlicher Intelligenz (KI) auf ein Maß beschränkt, das für den Nutzer akzeptierbar ist, oder die Transparenz und Nachvollziehbarkeit des autonomen Verhaltens muss durch entsprechende Maßnahmen gesteigert werden (z.B. menschenlesbare Darstellung wichtiger Entscheidungen auf Display, optische oder akustische Ankündigung der nächsten Schritte).

Im Zusammenhang mit einem Einsatz selbststeuernder Fahrzeugkollektive in intralogistischen Prozessen ist ebenfalls eine skeptische Grundhaltung seitens der Anlagenbetreiber zu erwarten. Es gilt die gleiche Forderung nach Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Systemverhaltens wie für andere technische Systeme mit autonomem Verhalten. Entsprechend sind Monitoring-Werkzeuge, die das Systemverhalten nachvollziehbar darstellen, und belastbare Kennzahlensysteme zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit, Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit selbststeuernder Anlagen zu entwickeln. Das Vorhandensein derartiger Werkzeuge und Berechnungsmethoden stellt ergänzend zur technischen Realisierung selbststeuernder Fahrzeugkollektive und deren Kommunikationsfähigkeit eine wichtige Voraussetzung für den zukünftigen praktischen Einsatz förderer technischer Schwärme dar.

Literaturverzeichnis

- [Alp-2010] Alpaydin, E.: Introduction to Machine Learning. 2. Auflage. The MIT Press, Cambridge, London: 2010. ISBN 978-0-262-01243-0.
- [Arn-2006] Arnold, D.: Einleitung des Herausgebers. In: Arnold, D. (Hrsg.): Intralogistik – Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Springer, Berlin u.a.: 2006. ISBN 978-3-540-29657-7, S. 1-4.
- [Arn-2009] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. 6.; erweiterte Auflage. Springer, Berlin u.a.: 2009. ISBN 978-3-642-01404-8.
- [Bam-2000] Bambynek, A.: Integration eines flexiblen Hängekran-/Hängebahnsystems in den innerbetrieblichen Materialfluss. In: Günthner, W. A.; Reinhart, G. (Hrsg.): Abschlussbericht MATVAR – Materialflusssysteme für variable Fertigungssegmente im dynamischen Produktionsumfeld. Herbert Utz Verlag, München: 2000. ISBN 978-3-89675-927-2, S. 6|1-6|21.
- [Bau-1991] Bauer, F. L.; Goos, G.: Informatik 1. 4., verbesserte Auflage. Springer, Berlin u.a.: 1991. ISBN 978-3-540527909.
- [Bel-2007] Bellifemine, F. L.; Caire, G.; Greenwood, D.: Developing Multi-Agent Systems with JADE. John Wiley & Sons, Chichester: 2007. ISBN 978-0-470-05747-6.
- [Ber-2009] Berbig, D.; Schönung, F.; Mayer, S. H.; Furmans, K.: Der FlexFörderer – ein vollständig dezentral gesteuerter, modularer und ortsungebundener Stetigförderer. In: Scheid, W.-M. (Hrsg.): Tagungsband zum 5. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL e.V.), Technische Universität Ilmenau, 01.-02. Oktober 2009. Universitätsverlag Ilmenau: 2009. ISBN 978-3-939473-56-5, S. 137-148.
- [BEU-2012] BEUMER Group GmbH & Co. KG : Gepäckabfertigungs-Systeme – BEUMER autover System. <http://www.beumergroup.de/de/produkte/gepaeckabfertigungs-systeme/hochgeschwindigkeits-transportsysteme/beumer-autoverr>. Download: 20.07.2012.
- [BIT-2011] BITKOM: Das mobile Internet boomt. Presseinformation vom 7. Februar 2011. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM), Berlin: 2011. http://www.bitkom.org/66807_66799.aspx. Download: 05.07.2012.

- [Bol-1998] Boles, D.: Skript zur Vorlesung Multimedia-Systeme. Sommersemester 1998, Kapitel 18. Fachbereich Informatik. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. <http://www-is.informatik.uni-oldenburg.de/~dibo/teaching/mm98/script98/node20.html>. Download: 31.07.2012.
- [Bop-2008] Boppert, J.: Entwicklung eines wissensorientierten Konzepts zur adaptiven Logistikplanung. Dissertation. Technische Universität München. Herbert Utz Verlag, München: 2008. ISBN 978-3-9811819-4-4.
- [Bow-1996] Bowersox, D. J.; Closs, D. J.: Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process. McGraw-Hill Companies: 1996. ISBN 978-0-070068834.
- [Bre-1998] Brenner, W.; Zarnekow, R.; Wittig, H.: Intelligente Softwareagenten – Grundlagen und Anwendungen. Springer, Berlin u.a.: 1998. ISBN 978-3-540634317.
- [BUN-2009] Bundesnetzagentur: Allgemeinzuteilung von Frequenzen für Funkanwendungen für intelligente Verkehrssysteme („Intelligent Transport Systems“, ITS). Vfg. Nr. 69 / 2009.
- [Bus-1996] Bussmann, S.: A Multi-agent Approach to Dynamic, Adaptive Scheduling of Material Flow. In: Perram, J. W.; Müller, J.-P. (Hrsg.): Distributed Software Agents and Applications (MAAMAW'94), LNAI 1069. Springer, Berlin: 1996. ISBN 978-3-540-61157-8, S. 191–205.
- [C2C-2007] CAR 2 CAR Communication Consortium: Manifesto - Overview of the C2C-CC System. Version 1.1., http://elib.dlr.de/48380/1/C2C-CC_manifesto_v1.1.pdf. Download: 16.03.2012.
- [Chi-2010] Chisu, R.: Kommunikations- und Steuerungsstrategien für das Internet der Dinge. Dissertation. München: Technische Universität München. 2010. ISBN 978-3-941702-05-9.
- [COG-2012] CogniLog. EFRE-Projekt (europäischer Strukturfonds für regionale Entwicklung). URL: <http://www.cognilog.uni-hannover.de/>. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Download: 10.08.2012.
- [Cor-1991] Corkill, D. D.: Blackboard Systems. In: AI Expert, Jg. 6 (1991) Nr. 9, ISSN 0888-3785, S. 40-47.
- [Cor-2012] Cortese, E.; Quarta, F.; Vitaglione, G.: Scalability and Performance of JADE Message Transport System. In: AAMAS Workshop on AgentCities, Bologna, 15.-19. Juli 2002.
- [Cra-1995] Craig, I.: Blackboard Systems. Intellect Books Ablex Publishing Corporation, Norwood, New Jersey: 1995. ISBN 978-0-8939-1594-0.

- [DEM-2012] Dematic Group S.à.r.l.: Multishuttle. <http://www.dematic.com/de/multishuttle>. Download: 18.08.2012.
- [DIN 15201-1] DIN 15201-1:1994: Stetigförderer – Benennungen. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin. Beuth, Berlin: 1994.
- [Dor-2010] Dorigo, M. et al. (Hrsg.): Swarm Intelligence. Proceedings of the 7th International Conference ANTS 2010, Brüssel, September 2010. Springer, Berlin u.a.: 2010. ISBN 978-3-642-15460-7.
- [Fat-1994] Fathi-Torbaghan, M.; Höffmann, A.: Fuzzy Logik und Blackboardmodelle in der technischen Anwendung. Oldenbourg Verlag, München, Wien: 1994. ISBN 978-3-486226508.
- [Fin-2006] Fine, C.; Klym, N.; Tavshikar, M.; Trossen, D.: The Evolution of RFID Networks: The Potential for Disruptive Innovation. In: MIT Center for eBusiness : Research Briefs, o. Jg. (2006) Vol. VIII/Nr. 1.
- [FIPA-2009] Foundation for Intelligent Physical Agents: FIPA Homepage. <http://www.fipa.org>. 2009. Download: 14.11.2011.
- [Fit-2012] Fitze, U.: Globalisierung – Mehr Wohlstand, aber auch mehr Ungleichheit. In: Siemens AG (Hrsg.): Pictures of the Future, o. Jg. (2012) Nr. 1 (Frühjahr), ISSN 1618-548X, S. 12-13.
- [Fle-2005] Fleisch, E.; Mattern, F. (Hrsg.): Das Internet der Dinge – Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis. Springer, Berlin u.a.: 2005. ISBN 978-3-540-24003-7.
- [Fol-2008] Follert, G.; Roidl, M.: Evaluation of routing strategies for decentralized self-organization in large scale conveyor systems. In: Ellis, K. (Hrsg.): Progress in Material Handling Research - 10th International Material Handling Research Colloquium, 28. Mai – 2. Juni 2008. Braun-Brumfield, Ann Arbor: 2008. S. 160–184.
- [Fuj-2000] Fujimoto, R. M.: Parallel and Distributed Simulation Systems. Wiley-Interscience Publication, New York u.a.: 2000. ISBN 978-0-47118383-9.
- [Fur-2009] Furmans, K.; Mayer, S.: Vollständig dezentraler und autonomer Flexförderer – Neun Module im Versuchsbetrieb. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 49 (2009) Nr. 6, ISSN 0017-9442, S. 308-309.
- [Gam-1995] Gamma, E.; Helm, R.; Johnson, R.; Vlissides, J.: Design-Patterns – Elements of Reusable Object-Oriented Software. Addison-Wesley, Reading: 1995. ISBN 978-0-201633610.

- [GEB-2012] Gebhardt Fördertechnik GmbH: FlexConveyor. <http://www.gebhardt-foerdertechnik.de/produkte/flexconveyor.html>. Download: 20.07.2012.
- [GOL-2012] Golem.de: Roboter statt Menschen im Lagerhaus – Amazon kauft Kiva Systems. Nachricht vom 19. März 2012. <http://www.golem.de/news/amazon-kauft-kiva-systems-roboter-statt-menschen-im-lagerhaus-12-03-90622.html>. Download: 20.03.2012.
- [Grä-2009] Gräbner, M.: Roboter im Schwarm. In: c't – Magazin für Computertechnik, o. Jg. (2009) Nr. 20, ISSN 0724-8679, S. 54-55.
- [Gui-2008] Guizzo, E.: Three Engineers, Hundreds of Robots, One Warehouse - Kiva Systems wants to revolutionize distribution centers by setting swarms of robots loose on the inventory In: IEEE Spectrum, Jg. 45 (2008) Nr. 7, ISSN 0018-9235, S. 26-34 (<http://dx.doi.org/10.1109/MSPEC.2008.4547508>).
- [Gün-2004] Günthner, W. A.; Wilke, M.: M2 - Wandelbare Logistikstrukturen in Minifabriken. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Arbeits- und Ergebnisbericht des Sonderforschungsbereichs 582: Marktnahe Produktion individualisierter Produkte. Technische Universität München: 2004, S. 299-333.
- [Gün-2006a] Günthner, W. A.; Chisu, R.; Kuzmany, F.: Selbststeuernde Materialflussmittel – Ein Technologiebaustein für das Internet der Dinge. In: Pfohl, H.-C.; Wimmer, T. (Hrsg.): Wissenschaft und Praxis im Dialog: Steuerung von Logistiksystemen – auf dem Weg zur Selbststeuerung. Deutscher Verkehrs-Verlag DVV, Hamburg: 2006. ISBN 978-3-871543401, S. 307-319.
- [Gün-2006b] Günthner, W. A.; Heinecker, M.; Wilke, M.: Modulare Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen. Abschlussbericht IGF-Forschungsvorhaben Nr. 14021 N. Lehrstuhl fml, Technische Universität München: 2006.
- [Gün-2008a] Günthner, W. A.; Chisu, R.; Kuzmany, F.: Internet der Dinge – Zukunftstechnologie mit Kostenvorteil. In: F+H Fördern und Heben, Jg. 58 (2008) Nr. 10, ISSN 0341-2636, S. 556-558.
- [Gün-2008b] Günthner, W. A.; Kraul, R.; Tenerowicz, P.; Chisu, R.; Kuzmany, F.: Vom Prozess zum Ereignis – Ein neuer Denkansatz in der Logistik. In: Wolf-Kluthausen, H. (Hrsg.): Jahrbuch Logistik 2008. free beratung GmbH, Korschenbroich: 2008. ISBN 3-9809412-4-8, S. 224-228.
- [Gün-2008c] Günthner, W. A.; Chisu, R.; Kuzmany, F.: Internet der Dinge – Steuern ohne Hierarchie. In: F+H Fördern und Heben, Jg. 58 (2008) Nr. 9, ISSN 0341-2636, S. 494-497.

- [Gün-2010a] Günthner, W. A.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Springer, Berlin u.a.: 2010. ISBN 978-3-642-04895-1.
- [Gün-2010b] Günthner, W. A.: Materialfluss und Logistik. Vorlesungsskriptum: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2010.
- [Gün-2012] Günthner, W. A.: Förder- und Materialflusstechnik. Vorlesungsskriptum: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2012.
- [Han-2000] Handrich, W.: Entwicklung eines stufenweise automatisierbaren Leichtfördersystems im Überflurbereich. In: Günthner, W. A.; Reinhart, G. (Hrsg.): Abschlussbericht MATVAR – Materialflusssysteme für variable Fertigungssegmente im dynamischen Produktionsumfeld. Herbert Utz Verlag, München: 2000. ISBN 978-3-89675-927-2, S. 5|1-5|21.
- [Han-2002] Handrich, W.: Flexible, flurfreie Materialflusstechnik für dynamische Produktionsstrukturen. Dissertation. Technische Universität München. Herbert Utz Verlag, München: 2002. ISBN 3-8316-0106-2.
- [HAT-2012] Hatteland Group (Hatteland Logistics): AutoStore. <http://www.hatteland.com>. Download: 21.07.2012.
- [Hei-2006] Heinecker, M.: Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme. Dissertation. Technische Universität München. Herbert Utz Verlag, München: 2008. ISBN 3-8316-0620-X.
- [Hei-2011a] Heiserich, G.: Kooperative Ablaufsteuerung für innerbetriebliche Materialflusssysteme. Dissertation. Leibniz Universität Hannover. PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, Hannover: 2011. ISBN 9778-3-943104-02-8.
- [Hei-2011b] Heidenblut, V.: Kompaktlagersysteme im Vergleich – Pro und Contra ausgewählter Technologien. In: F+H Fördern und Heben, Jg. 61 (2011) Nr. 5, ISSN 0341-2636, S. 222-226.
- [Hep-2007] Heptner, K.; Günthner, W. A.: Technische Innovationen für die Logistik. Huss-Verlag, München: 2007. ISBN 978-3-937711-54-6.
- [Hip-2009] Hippenmeyer, H.; Furmans, K.; Stoll, T.; Schönung, F.: KARIS – dezentral gesteuert. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 49 (2009) Nr. 6, ISSN 0017-9442, S. 304-306.
- [Hom-2004] ten Hompel, M.; Sondhof, U.; Libert, S.: Vorzüge dezentraler autonomer Steuerungssysteme. In: F+H Fördern und Heben, Jg. 54 (2004) Nr. 11, ISSN 0341-2636, S. 640-641.

- [Hom-2005] ten Hompel, M.; Liekenbrock, D.; Stür, P.: *Realtime Logistics* – echtzeitnahe Steuerung von Materialflusssystemen auf Basis autonomer Agenten und Entitäten. In: *Logistics Journal* : Nicht referierte Publikationen, o. Jg. (2005), ISSN 1860-5923 (http://dx.doi.org/10.2195/LJ_Not_Ref_d_tenHompel_0320052).
- [Hom-2006a] ten Hompel, M.: Das Internet der Dinge – Potenziale autonomer Objekte und selbstorganisierender Systeme in der Intralogistik. In: Arnold, D. (Hrsg.): *Intralogistik – Potentiale, Perspektiven, Prognosen*. Springer, Berlin u.a.: 2006. ISBN 978-3-540-29657-7, S. 266-276.
- [Hom-2006b] ten Hompel, M.: Das Internet der Dinge – Autonome Objekte und selbstorganisierende Systeme im innerbetrieblichen Materialfluss. In: *VDI-Berichte Nr. 1928*, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf: 2006. ISBN 3-18-091928-0, S. 291-299.
- [Hom-2006c] ten Hompel, M.: Zellulare Fördertechnik. In: *Logistics Journal* : Nicht referierte Publikationen, o. Jg. (2006), ISSN 1860-5923 (http://dx.doi.org/10.2195/LJ_Not_Ref_d_tenHompel_082006).
- [Hom-2008] ten Hompel, M.; Follert, G.; Roidl, M.: Künstliche Intelligenz im Internet der Dinge – Die Zukunft der Materialflusssteuerung mit autonomen Agenten. In: Wolf-Kluthausen, H. (Hrsg.): *Jahrbuch Logistik 2008*. freeberatung GmbH, Korschenbroich: 2008. ISBN 3-9809412-4-8, S. 24-29.
- [Hom-2009] ten Hompel, M.; Libert, S.; Roidl, M.: Erarbeitung von Methoden und Regeln zur Gestaltung agentengestützter, dezentraler Steuerungen für den Einsatz in komplexen Materialflusssystemen. Forschungsbericht IGF-Projekt-Nr. 15313 N. http://www.bvl.de/files/441/481/522/578/Schlussbericht_15313N.pdf. 2009. Download: 10.08.2012.
- [Hom-2011] ten Hompel, M.; Heidenblut, V.: *Taschenlexikon Logistik – Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*. 3., bearbeitete und erweiterte Auflage. Springer, Berlin u.a.: 2011. ISBN 978-3-642-19945-5.
- [Hül-2007] Hülsmann, M.; Windt, K.: *Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics – The Impact of Autonomy, Management, Information, Communication and Material Flow*. Springer, Berlin u.a.: 2007. ISBN 978-3-540-47449-4.
- [IEC 61131-3] IEC 61131-3:1993: *Programmable Controllers – Programming languages*. VDE Verlag, Berlin: 1993.

- [IFD-2011] Institut für Demoskopie Allensbach (IfD): Allensbacher Computer- und Technik-Analyse 2011 (ACTA 2011) – Zunahme der Online-Käufer und der Kauffrequenz. Institut für Demoskopie, Allensbach am Bodensee: 2011. http://www.ifd-allensbach.de/fileadmin/ACTA/ACTA_Praesentationen/2011/ACTA2011_deSombre.pdf. Download: 15.07.2012.
- [IGF 16166] IGF-Vorhaben 16166: Algorithmen und Kommunikationssysteme für die Zellulare Fördertechnik. Projekt im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi). <http://www.bvl.de/wissenschaft--forschung/abgeschlossene-projekte/projekte/16166-zellulare-foerdertechnik-2>. Download: 19.08.2012.
- [IoT-A] Internet of Things Architecture (IoT-A). Verbundprojekt im Rahmen des 7. EU-Rahmenprogramms für Forschung, Technische Entwicklung und Demonstration (FP7): <http://www.iot-a.eu>. Download: 18.08.2012.
- [Irr-2007] Irrgang, R.: Standards für erfolgreiche Logistikprojekte. In: Logistik für Unternehmen, Jg. 21 (2007) Nr. 3, ISSN 0930-7834, S. 64-67.
- [ISA-2008] International Society of Automation (ISA): The ISA100 Standards – Overview & Status. The ISA100 Road Show Presentation. http://www.isa.org/Content/Microsites1134/SP100,_Wireless_Systems_for_Automation/Home1034/ISA100_Overview_Oct_2008.pdf. 2008. Download: 18.01.2012.
- [ISO/IEC 7498-1] ISO/IEC 7498-1:1994: Information Technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The Basic Model. International Organization for Standardization (ISO). 1994.
- [JADE] JADE – Java Agent Development Framework. <http://jade.tilab.com>. Download: 13.08.2012.
- [Jen-2001] Jennings, N.: An Agent-based Approach for Building Complex Software Systems. In: Communications of the ACM, Jg. 44 (2001) Nr. 4, ISSN 0001-0782, S. 35-41.
- [Jia-2008] Jiang, D.; Delgrossi, L.: IEEE 802.11p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments. In: Tagungsband zur 67th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2008-Spring), Marina Bay, Singapore. IEEE Operations Center, Piscataway: 2008. ISBN 978-1-4244-1645-5, S. 2036-2040.
- [Jün-1989] Jünemann, R.: Materialfluss und Logistik – Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Springer, Berlin u.a.: 1989. ISBN 3-540-51225-X.

- [Jün-1998] Jünemann, R.; Beyer, A.: Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen: Informations- und Steuerungssysteme, Automatisierungstechnik – Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen. 2. Auflage. Springer, Berlin u.a.: 1998. ISBN 3-540-64514-4.
- [Jun-2004] Jungmann, V.: „MultiShuttle“ als Alternative in der Behälterlagertechnik. In: Logistik für Unternehmen, Jg. 18 (2004) Nr. 6, ISSN 0930-7834, S. 35-37.
- [Jun-2011] Jungbluth, V.: Der Schwarm auf der Schiene – Smart Carrier: Flexibel, skalierbar, systemsicher. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 51 (2011) Nr. 4, ISSN 0017-9442, S. 178-179.
- [Kam-2011] Kamagaew, A.; Große, E.: Multimodales Intralogistikkonzept: Zellulare Transportsysteme – Multishuttle Move. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 51 (2011) Nr. 4, ISSN 0017-9442, S. 170-172.
- [Ket-1984] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. Carl Hanser Verlag, München, Wien: 1984. ISBN 978-3-446-13825-0.
- [Kla-2010] Klaus, P.; Hartmann, E.; Kille, C.: Die Top 100 der Logistik – Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer in der Logistikdienstleistungswirtschaft. Ausgabe 2010/2011. Deutscher Verkehrs Verlag DVV, Hamburg: 2010. ISBN 978-3-871544316.
- [Krc-2010] Krcmar, H.: Informationsmanagement. 5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer, Berlin u.a.: 2010. ISBN 978-3-642-04285-0.
- [KUK-2012] KUKA Roboter GmbH: Leichtbauroboter. <http://www.kuka-robotics.com/germany/de/products/addons/lwr>. Download: 09.02.2012.
- [Kuz-2010] Kuzmany, F.: Konzeption und Entwicklung von Modulen für das Internet der Dinge. Dissertation. München: Technische Universität München. 2010. ISBN 978-3-941702-06-6.
- [LAN-2012] Lanfer CARGO-Technik: THINGtelligence. <http://www.thingtelligence.com>. Download: 17.08.2012.
- [Law-2009] Lawrenz, W. (Hrsg.): CAN Contoller Area Network – Grundlagen und Praxis. 5., überarbeitete Auflage. Hüthig Verlag, Heidelberg: 2009. ISBN 978-3-778529065.
- [Lib-2011] Libert, S.: Beitrag zur agentenbasierten Gestaltung von Materialflusssteuerungen. Dissertation. Technische Universität Dortmund. Verlag Praxiswissen, Dortmund: 2011. ISBN 978-3-86975-049-1.

- [Lie-2007] Liekenbrock, D.: Softwareagenten. In: Gillert, F.; Hansen, W.-R.: RFID für die Optimierung von Geschäftsprozessen. Carl Hanser Verlag, München Wien: 2007. ISBN 978-3-446-40507-3, S. 122-136.
- [Lie-2009] Liekenbrock, D.: Zellulare Automaten zur Modellierung der Selbststeuerung von Materialflusssystemen. Dissertation. Technische Universität Dortmund. Verlag Praxiswissen, Dortmund: 2009. ISBN 978-3-86975-006-4.
- [Liu-2010] Liu, W.; Winfield, A. F. T.: Autonomous Morphogenesis in Self-assembling Robots Using IR-Based Sensing and Local Communications. In: Dorigo, M. et al. (Hrsg.): Swarm Intelligence. Proceedings of the 7th International Conference ANTS 2010, Brüssel, September 2010. Springer, Berlin u.a.: 2010. ISBN 978-3-642-15460-7, S. 107-118.
- [LOG-2012] Logistik Baden-Württemberg (Website): Definition *Distributionszentrum*. http://www.logistik-bw.de/Begriffserklaerung.146+M55258e6ae72.0.html?&tx_a21glossary%5Bback%5D=24&tx_a21glossary%5Buid%5D=16. Download: 08.02.2012.
- [Mar-2011] Martini, A.; Stache, U.; Trenker, F.: Automatische Kleinteillager – eine Wahl mit Qual. In: Logistik für Unternehmen, Jg. 25 (2011) Nr. 11/12, ISSN 0930-7834, S. 26-29.
- [Mar-2012] Marsiske, H.-A.: Volles Verständnis – Teamfähige Roboter sollen Rettungskräfte unterstützen. In: c't – Magazin für Computertechnik, o. Jg. (2012) Nr. 2, ISSN 0724-8679, S. 76-77.
- [Mat-2005] Mathias, C. J.; Phifer, L.: The Evolving Wireless Landscape. In: Business Communications Review, o. Jg. (2005) April, S. 18-23.
- [Mat-2009] Mattern, F.; Flörkemeier, C.: Vom Internet der Computer zum Internet der Dinge. <http://www.vs.inf.ethz.ch/publ/papers/Internet-der-Dinge.pdf>. 2009. Download: 17.08.2012.
- [May-2009] Mayer, S. H.: Development of a completely decentralized control system for modular continuous conveyors. Dissertation. Universität Karlsruhe (TH). Universitätsverlag Karlsruhe: 2009. ISBN 978-3-86644-366-2.
- [May-2010] Mayer, T. R.; Libert, S.; ten Hompel, M.: Ein Beitrag zur Bewertung der Leistung dezentraler Materialflusststeuerungssysteme am Beispiel eines Steuerungsprototyps. In: Logistics Journal : Referierte Veröffentlichungen, o. Jg. (2010), ISSN 1860-7977 (http://dx.doi.org/10.2195/LJ_Ref_Mayer_Libert_tenHompel).

- [MYS-2007] MySQL AB: Hochverfügbarkeitslösungen von MySQL – Ein Überblick über die Hochverfügbarkeitslösungen von MySQL. Technisches Whitepaper. <http://www.mysql.de>. Januar 2007. Download: 17.12.2010.
- [NE 124] NAMUR-Empfehlung 124: Anforderungen an Wireless Automation (Version: 06.09.2010). Erstellt durch: NAMUR-Arbeitskreis 4.15 *Wireless Automation*. NAMUR-Geschäftsstelle, Leverkusen: 2010.
- [Net-2010] Nettsträter, A.; Kuzmany, F.: Rechenplattformen und RFID für das Internet der Dinge. In: Günthner, W. A.; ten Hompel, M. (Hrsg.): *Internet der Dinge in der Intralogistik*. Springer, Berlin u.a.: 2010. ISBN 978-3-642-04895-1, S. 107-118.
- [Nie-2010] Nieke, C.: Materialflusssteuerung heute und ihre Defizite. In: Günthner, W. A.; ten Hompel, M. (Hrsg.): *Internet der Dinge in der Intralogistik*. Springer, Berlin u.a.: 2010. ISBN 978-3-642-04895-1, S. 15-21.
- [Nii-1986] Nii, H. P.: The Blackboard Model of Problem Solving and the Evolution of Blackboard Architectures. *The AI Magazine*, Jg. 7 (1986) Nr. 2, S. 38-53.
- [NN-2011] Unbekannter Verfasser: Autonom ans Ziel – Transfersystem schafft rationelle Abläufe. In: *F+H Fördern und Heben*, Jg. 61 (2011) Nr. 5, ISSN 0341-2636, S. 216-218.
- [Nop-2009] Nopper, J. R.; ten Hompel, M.: Analysis of the Relationship Between Available Information and Performance in Facility Logistics. In: *Logistics Research*, Jg. 1 (2009) Nr. 3-4, S. 173-183 (<http://dx.doi.org/10.1007/s12159-009-0019-4>).
- [Nop-2011] Nopper, J. R.: Eine Methodik zur Bewertung von Wandelbarkeit in der Intralogistik am Beispiel selbstorganisierter Materialflusssysteme. Dissertation. Technische Universität Dortmund. Verlag Praxiswissen, Dortmund: 2011. ISBN 978-3-86975-040-8.
- [NS2-2004] NS-2 – The Network Simulator. 2004. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>. Download: 21.08.2012.
- [Ove-2010] Overmeyer, L.; Ventz, K.; Falkenberg, S.; Krühn, T.: Interfaced Multidirectional Small Scaled Modules for Intralogistics Operations. In: *Logistics Research*, Jg. 2 (2010) Nr. 2, S. 123-133 (<http://dx.doi.org/10.1007/s12159-010-0038-1>).
- [Ove-2011] Overmeyer, L.; Schachmanow, J.; Nickel, R.: Agenten im *soften* Einsatz – Projekt *Dezentrale, agentenbasierte Selbststeuerung von FTS*. In: *Hebezeuge Fördermittel*, Jg. 51 (2011) Nr. 12, ISSN 0017-9442, S. 688-689.

- [Pfo-2010] Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme – Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 8., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Springer, Berlin u.a.: 2010. ISBN 978-3-642-04161-7.
- [PFT-2000] Projektträgerschaft für Produktion und Fertigungstechnologien (PFT): Abschlussbericht Drahtlose Feldbusse im Produktionsumfeld (Funbus) – BMBF-Projekt im Rahmen von „Produktion 2000“ (Förderkennzeichen: 02PV4060). INTERBUS CLUB Deutschland e.V., Blomberg: 2000.
- [Phi-1993] Philipp, M.; Weiß, M.: Ein hierarchischer Blackboard-Ansatz für verteilte PPS-Systeme. In: Müller, J. (Hrsg.): Beiträge zum Gründungsworkshop der Fachgruppe Verteilte Künstliche Intelligenz – Dokument D-93-06. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, Saarbrücken: 1993, S. 77-89.
- [Reh-1996] Rehäuser, J.; Krcmar, H.: Wissensmanagement in Unternehmen. In: Schreyögg, G.; Conrad, P. (Hrsg.): Managementforschung 6 – Wissensmanagement. de Gruyter, Berlin, New York: 1996, ISBN 978-3-110149999, S. 1-40.
- [Sch-2005] Schroer, W.: MultiShuttle – universell einsetzbar. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 45 (2005) Nr. 1-2, ISSN 0017-9442, S. 34-36.
- [Sch-2006] Schnell, G.; Wiedemann, B. (Hrsg.): Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik. 6., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden: 2006. ISBN 978-3-83480045-7.
- [Sch-2007a] Scholz-Reiter, B.; de Beer, C.; Böse, F.; Windt, K.: Evolution in der Logistik – Selbststeuerung logistischer Prozesse. In: VDI-Berichte Nr. 1978, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf: 2007. ISBN 978-3-18-091978-2, S. 179-190.
- [Sch-2007b] Scholz-Reiter, B.; Jagalski, T.; de Beer, C.; Freitag, M.: Autonomous Shop Floor Control Considering Set-up Times. In: Proceedings of the 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, 2007.
- [Sch-2010a] Scholz-Reiter, B.; Sowade, S.; Hildebrandt, T.; Rippel, D.: Modeling of Orders in Autonomously Controlled Logistic Systems. In: Production Engineering Research & Development, Jg. 4 (2010) Nr. 4, ISSN 0944-6524, S. 319–325.
- [Sch-2010b] Schuldt, A.: Multiagent Coordination Enabling Autonomous Logistics. Springer, Berlin u.a.: 2011. ISBN 978-3-64-220091-5.

- [Sch-2011] Schweikl, T.: Invasion der Shuttles. In: LOGISTIK HEUTE, Jg. 33 (2011) Nr. 4, ISSN 0173-6213, S. 22-25.
- [See-2005] Seemüller, S.: Durchsatzberechnung automatischer Kleinteilelager im Umfeld des elektronischen Handels. Dissertation. Technische Universität München. Herbert Utz Verlag, München: 2005. ISBN 3-8316-0581-5.
- [SEG-2012] Urban Mobility Germany Authorized Segway Distributor GmbH: Segway Personal Transporter. <http://www.segway.de>. Download: 20.08.2012.
- [Sen-2011] Senouci, S. M.; Benslimane, A.; Moustafa, H.: Cooperation in Autonomous Vehicular Networks. In: Obaidat, M. S.; Misra, S.: Cooperative Networking. John Wiley & Sons, Chichester: 2011. ISBN 978-0-470749159.
- [Sha-1949] Shannon, C. E.; Weaver, W.: The Mathematical Theory of Communication. The University of Illinois Press, Urbana: 1949.
- [Sic-2010] Siciliano, B.; Sciavicco, L.; Villani, L.; Oriolo, G.: Robotics – Modelling, Planning and Control. Springer, London: 2010. ISBN 978-1-84628641-4.
- [Ste-2002] Stenzel, R.: Steuerungsarchitekturen für autonome mobile Roboter. Dissertation: RWTH Aachen. Aachen. 2002.
- [Sto-1986] Stonebraker, M.: The Case for Shared Nothing Architecture. In: IEEE Database Engineering Bulletin, Jg. 9 (1986) Nr. 1, S. 4-9.
- [Sun-2010] Sundmacher, H.; Guillemin, P.; Friess, P.; Woelfflè, S. (Hrsg.): Cluster of European Research on the Internet of Things (CERP-IoT) – Vision and Challenges for Realizing the Internet of Things. Publication Office of the European Union, Luxemburg: 2010. ISBN 978-92-79-15088-3.
- [SYM-2012] SYMBRION. EU-Projekt im Rahmen der FET Proactive Initiative: Pervasive Adaption. <http://www.symbion.eu>. Download: 20.08.2012.
- [Ten-2011] Tenerowicz, P.; Günthner, W. A.: Modularisierung und Dezentralisierung in der Intralogistik – Auf dem Weg zur zellularen Fördertechnik. In: Industrie Management, Jg. 27 (2011) Nr. 1, ISSN 1434-1980, S. 25-29.

- [Ten-2012] Tenerowicz-Wirth, P.; Günthner, W. A.: Agent-based Emulation of an Electric Overhead Monorail System Pilot Plant: Testing and Virtual Extension of an Existing Test Facility. In: Uckelmann, D.; Scholz-Reiter, B.; Rügge, I.; Hong, B.; Rizzi, A. (Hrsg.): Proceedings of the First International Conference ImViReLL 2012, Bremen, 28. Februar - 1. März 2012. Springer, Berlin u.a.: 2012. ISBN 978-3-642-28815-9, S. 90-101.
- [Tit-2005] Titzer, B.; Lee, D. K.; Palsberg, J.: Aurora – Scalable Sensor Network Simulation with Precise Timing. In: Proceedings of the 4th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05), Los Angeles, 2005. IEEE Press, Piscataway: 2005. ISBN 0-7803-9202-7.
- [Ull-2006] Ullrich, G.; Simen, F.; Sommer-Dittrich, T.: Quo Vadis, FTS? (2/2). In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 46 (2006) Nr. 1-2, ISSN 0017-9442, S. 14-16.
- [Ull-2011] Ullrich, G.: Fahrerlose Transportsysteme. Eine Fibel – mit Praxisanwendungen – zur Technik – für die Planung. Vieweg+Teubner, Wiesbaden: 2011. ISBN 978-3-834807915.
- [Urd-2011] Urdaneta, G.; Pierre, G.; van Steen, M.: A Survey of DHT Security Techniques. In: ACM Computing Surveys (CSUR), Jg. 43 (2011) Nr. 2, ISSN 0360-0300, S. 1-53.
- [Uzc-2009] Uzcátegui, R. A.; Guillermo, A.-M.: WAVE: A Tutorial. In: IEEE Communications Magazine, Jg. 47 (2009) Nr. 5, ISSN 0163-6804, S. 126-133 (<http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2009.4939288>).
- [VDI 2510] VDI 2510:2005: Fahrerlose Transportsysteme (FTS). Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf. Beuth, Berlin: 2005.
- [VDI 3300] VDI 3300:1973: Materialfluß-Untersuchungen. Zurückziehungsdatum: 02.07.2008. Zurückziehungsgrund: fehlende Aktualisierung. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf. Beuth, Berlin: 1973.
- [VDI 3590-1] VDI 3590-1:2002: Kommissioniersysteme – Grundlagen. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf. Beuth, Berlin: 2002.
- [VDI/VDE 2653-1] VDI/VDE 2653-1:2010: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik – Grundlagen. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf. Beuth, Berlin: 2010.
- [VDI/VDMA 5100] VDI/VDMA-Richtlinienentwurf 5100:2011: Systemarchitektur für die Intralogistik (SAIL). Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Frankfurt/Main. Beuth, Berlin: 2011.

- [VDMA 15276]VDMA-Einheitsblatt 15276:1994: Datenschnittstellen in Materialflusssystemen. Zurückziehungsdatum: 02.07.2008. Grund der Zurückziehung: fehlende Aktualisierung. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Düsseldorf. Beuth, Berlin: 1994.
- [W3C-2008] W3-Consortium – Bray, T.; Paoli, J.; Sperberg-McQueen, C. M.; Maler, E.; Yergeau, F. (Hrsg.): Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition) – W3C Recommendation 26th November 2008. <http://www.w3.org/TR/2008/REC-xml-20081126>. Download: 19.03.2012.
- [Wan-2008] Wannagat, A.; Vogel-Heuser, B.: Agent oriented Software-development for Networked Embedded Systems with Real Time and Dependability Requirements in the Domain of Automation. In: Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC'08), Seoul, Korea, 6. - 11. Juli 2008. ISBN 978-1-1234-7890-2, S. 4144-4149.
- [Wan-2010] Wannagat, A.: Entwicklung und Evaluation agentenorientierter Automatisierungssysteme zur Erhöhung der Flexibilität und Zuverlässigkeit von Produktionsanlagen. Dissertation. Technische Universität München. Sierke Verlag, Göttingen 2010. ISBN 978-3-86844-247-2.
- [Weh-2008] Wehking, K.-H.; Vorwerk, C.: Zukünftig: Stückgutförderung mit Fahrzeugschwarm. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 48 (2008) Nr. 5, ISSN 0017-9442, S. 242-245.
- [Weh-2012a] Wehking, K.-H.; Weber, M.; Schröppel, M.: Monofunktionale autonome Transporteinheiten (1/2) - KaTe - einfach, aber effizient. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 52 (2012) Nr. 1-2, ISSN 0017-9442, S. 24-26.
- [Weh-2012b] Wehking, K.-H.; Weber, M.; Schröppel, M.; Vorwerk, C.: Monofunktionale autonome Transporteinheiten (2/2) - Doppelkufensystem schafft bis zu 1000 kg. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 52 (2012) Nr. 3, ISSN 0017-9442, S. 80-82.
- [Wil-2006] Wilke, M.: Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen. Dissertation. Technische Universität München. Herbert Utz Verlag, München: 2006. ISBN 3-8316-0591-2.
- [Wil-2009] Wildemann, H.: Logistik Prozessmanagement. 4. Auflage. TCW Transfer-Centrum, München: 2009. ISBN 978-3-934155-61-9.
- [Woo-2002] Wooldridge, M.: An Introduction to Multi Agent Systems. John Wiley & Sons, Chichester: 2002. ISBN 0-47149691-X.

- [ZVEI-2008] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI): Koexistenz von Funksystemen in der Automatisierungstechnik – Erläuterungen zum zuverlässigen Parallelbetrieb von Funklösungen. ZVEI, Frankfurt am Main: 2008.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	7
Abbildung 2-1:	Bauformen Fahrerloser Transportfahrzeuge (Bildquellen: DS Automation, rocla)	16
Abbildung 2-2:	Ebenenmodell der Materialflussautomatisierung in der Logistik	18
Abbildung 2-3:	Zentrale (a), hierarchische/verteilte (b) und dezentrale (c) Steuerungsorganisation (in Anlehnung an [Jün-1998, S. 142])	19
Abbildung 2-4:	Dimensionen der Wandelbarkeit (in Anlehnung an [Wil-2006] und [Chi-2010])	23
Abbildung 2-5:	Ein <i>Internet der Dinge in der Intralogistik</i> ermöglicht hierarchielose Materialflusssysteme auf Basis kooperierender Entitäten (in Anlehnung an [Gün-2008c, S. 494])	27
Abbildung 2-6:	Einordnung autonomer mobiler Transportroboter als Modul im Klassendiagramm des <i>Internet der Dinge in der Intralogistik</i> (in Anlehnung an [Gün-2010a, S. 102])	31
Abbildung 2-7:	Vorteile des Internets der Dinge im Lebenszyklus eines Materialflusssystem (in Anlehnung an [Kuz-2010, S. 153ff; Nop-2011, S. 2])	32
Abbildung 2-8:	Prototypische Umsetzungen kleinskaliger Flurförderzeuge: KARIS, KaTe, Doppelkufensystem, Multishuttle Move (v.l.n.r., Bildquellen: IFL, IFT/Götting, IML/Dematic)	38
Abbildung 3-1:	Nachrichtenübertragungsmodell nach Shannon und Weaver (in Anlehnung an [Sha-1949, S. 5])	42
Abbildung 3-2:	Hierarchischer Zusammenhang zwischen den Begriffen <i>Zeichen, Daten, Information</i> und <i>Wissen</i> (in Anlehnung an [Reh-1996, S. 7] und [Bop-2008, S. 22])	43
Abbildung 3-3:	ISO/OSI Referenzmodell	44
Abbildung 3-4:	C2C-CC Protokollstapel (in Anlehnung an [C2C-2007, S. 33])	51
Abbildung 4-1:	Konzeptskizze <i>microCarrier</i> bzw. <i>μCarrier</i>	55
Abbildung 4-2:	Grafische Darstellung organischer Strukturen eines Roboterschwarms [Liu-2010]	56
Abbildung 4-3:	Verschiedene fördertechnische Realisierungsformen eines Materialflussgraphs	57
Abbildung 4-4:	Umsetzung logistischer Funktionen durch ein selbststeuerndes Fahrzeugkollektiv	59
Abbildung 4-5:	Bereichsweise Schwankungen beim Behälterdurchsatz im Tagesverlauf	63
		158

Abbildung 4-6:	Entscheidungsbaum zur strukturierten Klassifizierung von Informationen mit beispielhafter Einordnung der Informationen <i>Transportauftrag</i> und <i>Not-Aus-Signal</i>	68
Abbildung 4-7:	Einordnung verschiedener Informationsarten nach Datenmenge und Zeitvorgaben	69
Abbildung 4-8:	Elektrohängebahnanlage und Kranfeld in der Versuchshalle am Lehrstuhl fml	72
Abbildung 4-9:	Mischbetrieb eines realen Elektrohängebahnsystems (schwarz) und einer simulierten Anlagenerweiterung (hellgrau) in der Betriebsphase unter Verwendung eines agentenbasierten Emulationsbaukastens [Gün-2010, S. 165]	73
Abbildung 5-1:	Lizenzfrei nutzbare Frequenzen im elektromagnetischen Spektrum [ZVEI-2008]	90
Abbildung 5-2:	Auswahl geeigneter Datenformate in Abhängigkeit der Informationsart	100
Abbildung 5-3:	Funktionen und Komponenten des Blackboardsystems	103
Abbildung 5-4:	Zugriffssteuerung über Sperrungen	104
Abbildung 5-5:	UML-Sequenzdiagramm der umgesetzten Zugriffssteuerung	105
Abbildung 5-6:	Informationsbeschaffung über Abonnements (Push-Prinzip, l.) im Vergleich zur Pull-Logik nach dem Anfrage/Antwort-Prinzip (r.)	106
Abbildung 5-7:	UML-Sequenzdiagramm des umgesetzten Benachrichtigungsmechanismus	107
Abbildung 5-8:	Das Blackboardsystem als Schnittstelle zu übergeordneten Informationssystemen	108
Abbildung 5-9:	Logisches Kommunikationskonzept als Kombination aus direkter (Peer-to-Peer) und indirekter Kommunikation (via Blackboardsystem) zwischen den Softwareagenten	113
Abbildung 5-10:	Überwachungsmechanismus für verteiltes Blackboardsystem	115
Abbildung 5-11:	Fehlererkennung bei parallel betriebenen Blackboards	116
Abbildung 5-12:	Kommunikationskonzept für selbststeuernde Fahrzeugkollektive in der Intralogistik	124
Abbildung 6-1:	Grafische Oberfläche des verteilten Blackboardsystems (BB _d) bestehend aus drei Informationsknotenpunkten und der 2D-Visualisierung der EHB-Anlage	129
Abbildung 6-2:	Bereichsweise Blackboard-Zuordnung am Beispiel einer EHB-Anlage	131
Abbildung 6-3:	Anschauliche Darstellung der Unterschiede der vier möglichen Kommunikationsarten	134

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Systematik der Fördermittel für den Stückguttransport	14
Tabelle 2-2:	Systematik der mobilen flurgebundenen Systeme [VDI 2510]	17
Tabelle 3-1:	Beispielhafter Protokollstapel der Internet-Protokollfamilie	46
Tabelle 3-2:	WAVE-Protokollstapel	50
Tabelle 4-1:	Bewertung der Eignung selbststeuernder Fahrzeugkollektive zur Erfüllung logistischer Funktionen in innerbetrieblichen Materialflussprozessen	58
Tabelle 4-2:	Informationen der Materialflusssteuerung (inkl. Abkürzungen) nach [VDI/VDMA 5100] und der FTS-Steuerung nach [VDI 2510]	64
Tabelle 4-3:	Informationsarten in selbststeuernden Fahrzeugkollektiven	66
Tabelle 5-1:	Anwendungsklassifizierung nach dem ISA-SP100 Komitee [ISA-2008]	82
Tabelle 5-2:	Anforderungen an das Kommunikationssystem	87
Tabelle 5-3:	Überblick über drahtlose, funkbasierte Kommunikationstechniken (in Anlehnung an [Mat-2005], [Fin-2006], [Wil-2006] und [Krc-2010])	92
Tabelle 5-4:	Gewichtete Bewertung ausgewählter Funkstandards in Bezug auf die Anforderungen an das angestrebte Kommunikationssystem	94
Tabelle 5-5:	Gegenüberstellung funktionaler Aspekte der BB- und P2P-Kommunikation (in Anlehnung an [Chi-2010, S. 67])	109
Tabelle 5-6:	Lösungsansätze zur Steigerung der Robustheit und flexibleren Skalierbarkeit der Leistungsfähigkeit von Blackboardsystemen	111
Tabelle 6-1:	Formeln zur Berechnung des maximalen Nachrichtenaufkommens in Abhängigkeit vom angewandten Kommunikationsmodell (P2P/BB) und -prinzip (Push/Pull)	132
Tabelle 6-2:	Kommunikationssystem ohne globale Datensammler ($N = n$)	135
Tabelle 6-3:	Kommunikationssystem mit zwei globalen Datensammlern ($N = n + 2$)	135