

Forschungsbericht

# **Algorithmen und Kommunikationssysteme für die Zellulare Fördertechnik**

Günthner, W. A. · ten Hompel, M. · Tenerowicz-Wirth, P. · Büchter, H. · Schippl, M.

# Forschungsbericht

der Forschungsstellen

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML)

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (**fml**)

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur  
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16166 N**

**Algorithmen und Kommunikationssysteme für die Zellulare Fördertechnik**

der AiF-Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Herausgegeben von:

Prof. Dr. Michael ten Hompel

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML

Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4

44227 Dortmund

[www.iml.fraunhofer.de](http://www.iml.fraunhofer.de)

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

**fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

[www.fml.mw.tum.de](http://www.fml.mw.tum.de)

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Printed in Germany 2012

ISBN 978-3-941702-26-4



## Zusammenfassung

Eine zunehmende Produktindividualisierung bei gleichzeitig wachsendem Sortimentsumfang sowie globalisierte Beschaffungsmärkte im privaten wie auch im geschäftlichen Bereich steigern die Komplexität und Dynamik in Materialflusssystemen. Dies trifft besonders auf die Knoten der Distributionsnetze mit ihren Aufgaben der Kommissionierung und Verteilung von Waren zu. Dort äußert sich oben genannter Trend einerseits in wachsenden Artikelzahlen in den Distributionsnetzen und andererseits in mitunter stark schwankenden und daher schwer prognostizierbaren Auftragseingängen. Dies führt zu einer Zuspitzung des Zielkonfliktes zwischen maximaler Lieferbereitschaft und minimalem Bestand.

Vor diesem Hintergrund zeichnet sich ein Trend in Richtung dezentraler, flexibler und adaptiver Lösungen bei der materialfluss- und informationstechnischen Steuerung von Warenflüssen sowie bei deren Organisation ab. Gleichzeitig werden seitens der Mechanik jedoch weiterhin zahlreiche heterogene und ortsfeste Komponenten klassischer Stetigfördersysteme wie Rollenbahnen, Kurvenstücke, Weichen oder Pufferstrecken eingesetzt. Um die Potenziale der Dezentralisierung bzgl. Flexibilität, Robustheit und Wiederverwendbarkeit nicht nur im Bereich der Software nutzen zu können, untersucht das Forschungsprojekt die Potenziale einer konsequenten Substitution starrer, unflexibler Fördertechnik durch eine große Zahl einheitlicher Transportfahrzeuge, die logistische Aufgaben autonom erfüllen können. Im Gegensatz zu konventionellen Fahrerlosen Transportfahrzeugen fahren die Fahrzeuge dabei frei auf einer Fläche in zwei Dimensionen und sind somit nicht spurgebunden.

Das Forschungsvorhaben schafft die Voraussetzungen zur Realisierung dieses Konzepts, indem es adäquate Steuerungskonzepte, Algorithmen und Kommunikationssysteme entwickelt und in eine Simulationsplattform integriert. Ansätze aus dem Gebiet der mobilen Robotik werden dabei erstmals auf ein Fahrzeugkollektiv übertragen, welches in einer industriellen Umgebung ohne den Einsatz einer zentralen Steuerung selbstständig Transportaufträge abarbeitet. Für einen effizienten und zuverlässigen Datenaustausch innerhalb des Gesamtsystems wurden verteilte Informationsknotenpunkte nach dem „Blackboard“-Prinzip entwickelt.

**Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.**



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	1
1.2	Begriffserklärung „Zellulare Fördertechnik“	2
1.3	Forschungsziel und angestrebte Ergebnisse	4
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und Forschung</b>	<b>9</b>
2.1	Autonome mobile Roboter	9
2.1.1	Klassifizierung von Robotern	10
2.1.2	Mobile Transportroboter in der Intralogistik	13
2.2	Modelle der Materialflusssteuerung	20
2.2.1	VDMA 15276 – Datenschnittstellen in Materialflusssystemen	21
2.2.2	SAIL – Softwarearchitektur für die Intralogistik	23
2.2.3	Dezentrale Materialflusssteuerung im Internet der Dinge	24
2.3	Kommunikationstechnik	27
2.3.1	Kommunikation in Fahrerlosen Transportsystemen (FTS)	29
2.3.2	Car-to-X-Kommunikation (C2X)	31
<b>3</b>	<b>Anforderungsanalyse</b>	<b>43</b>
3.1	Referenzszenario	43
3.2	Analyse der prozessbedingten Anforderungen	49
3.2.1	Technische Anforderungen an die Fahrzeugsteuerung	51
3.2.2	Anforderungen an das Kommunikationssystem	52
3.3	Zusammenfassung	55
<b>4</b>	<b>Modellbildung und Simulation</b>	<b>57</b>
4.1	Fahrzeugmodell	57
4.2	Sensormodelle	60

4.3 Simulator	61
<b>5 Algorithmen</b>	<b>63</b>
5.1 Navigation	63
5.2 Ausweichverhalten	64
5.3 Wegefindung	67
5.4 Bahnplanung	68
5.5 Bahnregelung	73
5.6 Behandlung der Deadlockproblematik	75
5.7 Dispositionsverfahren	76
<b>6 Datenanalyse und Kommunikationsinfrastruktur</b>	<b>77</b>
6.1 Datenanalyse im Materialflusssystem	79
6.1.1 Informationsarten im Materialflusssystem	80
6.1.2 Klassifizierung relevanter Informationen	82
6.2 Kommunikationsinfrastruktur	85
6.2.1 Kommunikationstechnologien und -protokolle	87
6.2.2 Datenformate	108
6.2.3 Kommunikationskonzepte	112
6.3 Zusammenfassung	118
<b>7 Informationsknotenpunkte</b>	<b>121</b>
7.1 Eigenschaften von Blackboardsystemen	121
7.2 Implementierung des Blackboardsystems	125
7.3 Dezentralisierung durch den Parallelbetrieb mehrerer Blackboards	131
7.4 Zusammenfassung	141
<b>8 Validierung</b>	<b>143</b>
8.1 Funktionsüberprüfung mittels Simulation von Fahrzeugmodellen	143
8.2 Analyse der Fahrzeuglogik	143

8.3	Validierung der Algorithmen	143
8.4	Analyse des Kommunikationsverhaltens	144
<b>9</b>	<b>Forschungsergebnisse und Ausblick</b>	<b>147</b>
9.1	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse	147
9.2	Ausblick	148
9.3	Fazit	149
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>i</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xix</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xxi</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Eine zunehmende Individualisierung von Produkten bei gleichzeitig wachsendem Sortimentsumfang sowie die Möglichkeit der globalen Beschaffung im privaten wie auch im geschäftlichen Bereich führen zu neuartigen Anforderungen an Materialflusssysteme. So ist der Kunde heute in der Lage, jederzeit und weitgehend unabhängig vom eigenen Standort Waren über das Internet zu bestellen und auf diese Weise logistische Prozesse anzustoßen. Das Internet als bequemer und leistungsfähiger Vertriebskanal für Güter aller Art fördert gleichzeitig unentwegt verschiedenste Produkttrends, sowohl durch gezielt gestreute Werbung seitens der Unternehmen als auch durch den Austausch unter den Internetbenutzern in Foren und Online-Communities. Der Trend zur Produktindividualisierung wird sowohl von den Unternehmen, für die sich durch das Angebot individualisierter Produkte eine Chance zur Differenzierung bietet, als auch von den Kunden, die verstärkt individualisierte Produkte nachfragen, vorangetrieben. Diese Wettbewerbssituation führt zu einer Verkürzung von Innovations- und Produktlebenszyklen.

Die Folgen dieser Entwicklung sind einerseits wachsende Artikelzahlen in den Distributionsnetzen und andererseits mitunter stark schwankende Auftragseingänge. In den Knoten der Distributionsnetze mit ihren Aufgaben der Kommissionierung und Verteilung von Waren entsteht ein kritischer Anstieg von Komplexität und Dynamik, der nicht mehr mit den heuristischen Lösungen heutiger Tage zu bewältigen ist und die Intralogistik<sup>1</sup> zudem mit der Lösung des Zielkonfliktes zwischen maximaler Lieferbereitschaft und minimalem Bestand konfrontiert. Vor diesem Hintergrund zeichnet sich ein Trend in Richtung dezentraler, individueller, flexibler und adaptiver Lösungen bei der materialfluss- und informationstechnischen Steuerung von Warenflüssen sowie bei deren Organisation ab [Hom-2004, Hom-2006c]. Derzeit beschränken sich diesbezügliche Konzepte auf die Materialflussteuerung und zielen auf eine Dezen-

---

<sup>1</sup> „Die **Intralogistik** umfasst die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschlages in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen.“ [Arn-2006, S. 1]

tralisierung herkömmlicher, monolithischer Steuerungsarchitekturen ab. Gleichzeitig werden auf Seiten der Mechanik jedoch weiterhin zahlreiche heterogene und ortsfeste Fördertechnikkomponenten klassischer Stetigfördersysteme wie Rollenbahnen, Kurvenstücke, Weichen, Drehtische oder Pufferstrecken eingesetzt.

Um die Potenziale der Dezentralisierung bzgl. Flexibilität, Robustheit und Wiederverwendbarkeit nicht nur im Bereich der Software nutzen zu können, sollen die genannten Komponenten klassischer Stetigfördersysteme durch einheitliche Module, die autonom oder kooperativ logistische Aufgaben erfüllen können, ersetzt werden. Somit ergibt sich die Frage: „Wie kann ein Kollektiv kooperierender Fahrzeuge als Ersatz für konventionelle Fördertechnik eingesetzt werden?“ Dazu sind im Einzelnen die Fragen der zielgerichteten Führung, der Auftragsdisposition, der Ortung, der Wegfindung, der Kollisionsvermeidung sowie die Behandlung der Deadlockproblematik zu bearbeiten und adäquate Methoden und Algorithmen zu entwickeln sowie deren Praxistauglichkeit nachzuweisen.



**Abbildung 1-1: Kooperierendes Fahrzeugkollektiv als Ersatz für konventionelle Fördertechnik**

### 1.2 Begriffserklärung „Zellulare Fördertechnik“

Am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (**fml**) der Technischen Universität München (TUM) wurden in diesem Zusammenhang unter dem Begriff „ $\mu$ Carrier“ bzw. „microCarrier“ erste Konzepte für Schwarmfahrzeuge in der Intralogistik erarbeitet (vgl. Abbildung 1-2) [Weh-2008].

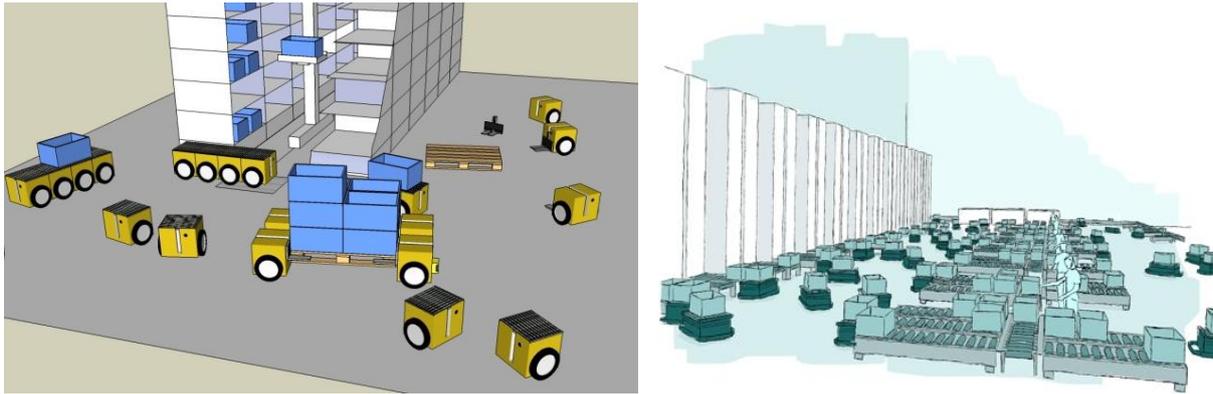


Abbildung 1-2:  $\mu$ Carrier/microCarrier (l.) und Zellulare Fördertechnik (Bildquellen: fml, IML)

Das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund prägte im Bezug auf Kollektive aus standardisierten, autonomen Kleinfahrzeugen den Begriff einer „Zellularen Fördertechnik“ (auch „Zellulares Transportsystem“) [Hom-2006b]. Allgemein gilt folgende Definition:

### Zellulare Transportsysteme

„(engl. *Cellular transport systems*; auch „Zellulare Fördertechnik“) basieren auf autonomen fördertechnischen „Entitäten“. Dies sind z.B. autonome Transportfahrzeuge ( $\rightarrow$  *Fahrerlose Transportfahrzeuge*) und/oder autonome Fördertechnikmodule. 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 entspr. (serviceorientierten) Umgebung selbstständig. Z. T. sind somit intralogistische Systeme höchster Flexibilität.“ [Hom-2011, S. 351]

Der Begriff „Zellulare Fördertechnik“ (bzw. „Zellulares Transportsystem“) umfasst somit zunächst jedwede Ausprägung von Fördertechnikmodulen, also auch ortsfeste Einheiten, sofern sich diese nach dem Plug-and-Play-Prinzip selbstständig zu einem Materialflusssystem zusammenschließen können und dadurch ein „organisches“

Wachstum ermöglichen. Um jedoch sämtliche Potenziale, die der Idee zellularer Fördersysteme innewohnen, zu heben, sollten die Fördertechnikmodule selbst möglichst flexibel gestaltet werden.

Dies beginnt bei der Ausstattung der Module mit autonomer Mobilität. Daher werden die Begriffe „Zellulares Transportsystem“ bzw. „Zellulare Fördertechnik“ im Folgenden stets in der Ausprägung eines Kollektivs autonomer Transportfahrzeuge verwendet. In dieser Ausprägung ergeben sich die angesprochenen organischen Eigenschaften durch das Hinzufügen bzw. Entfernen von Fahrzeugen. Das Fördersystem wird dadurch stark skalierbar und dynamisch rekonfigurierbar. Als Reaktion auf Spitzenlasten können zusätzliche Fahrzeuge eingesetzt werden, für Wartungsarbeiten können einzelne Fahrzeuge ausgeschleust bzw. ausgetauscht werden, ohne das Gesamtsystem (stark) zu beeinflussen.

### **1.3 Forschungsziel und angestrebte Ergebnisse**

#### **Forschungsziel**

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Untersuchung der konsequenten Substitution unflexibler, konventioneller Stetigfördertechnik durch eine große Zahl autonomer Transportfahrzeuge, die eine koordinierte Bearbeitung einer beliebigen innerbetrieblichen Transportaufgabe leisten. Im Gegensatz zu konventionellen Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) sollen die neuartigen Fahrzeuge in der Lage sein, eine Fläche frei in zwei Dimensionen zu befahren. Sie sind somit nicht an eine vorgegebene Fahrspur gebunden.

Ein Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist daher die Entwicklung praxisgerechter Algorithmen für den Betrieb einer fördertechnischen Anlage auf Basis eines kooperierenden Fahrzeugkollektivs einschließlich einer Simulationsumgebung. Diese Algorithmen gewährleisten unter anderem die Auftragsdisposition, die kollisionsfreie Fahrt, die Navigation sowie die termingerechte Erfüllung der Transportaufgabe. Wegen der komplexen Aufgabenstellung und des mit einer physischen Realisierung verbundenen hohen Aufwands werden die Algorithmen in einem Simulator getestet. Um eine hinreichende Modellierungstiefe zu erreichen, basiert die Simulation auf physikalischen Modellen der Fahrzeuge, der Antriebe und der Sensoren. Mit dieser Modellierungstiefe ist es möglich, die Algorithmen direkt in eine physische Umset-

zung zu übernehmen. Auf diese Weise lässt sich der Aufwand für Tests sowie Parameteranpassung und -optimierung bei der Inbetriebnahme verringern.

Ein weiteres Ziel ist die Bereitstellung eines zugeschnittenen Kommunikationssystems. Eine Grundvoraussetzung für den Betrieb eines solchen verteilten Systems ist die sichere und schnelle Kommunikation zwischen den beteiligten Einheiten. Da sich für die verschiedenen Vorgänge im System unterschiedliche Anforderungen bzgl. der zu übertragenden Datenmengen sowie der Zeit, die für die Kommunikation zur Verfügung steht, ergeben, sollen mehrere Kommunikationsmethoden zum Einsatz kommen. Der Fokus liegt dabei auf der Schaffung einer echtzeitfähigen Kommunikationsstruktur für die Koordination, Kooperation und Kollisionsvermeidung autonomer Fahrzeuge. Gerade für diese Aufgaben ist der Blackboard-Ansatz sehr gut geeignet. Dabei werden ein oder mehrere Informationsknotenpunkte von allen Systemteilnehmern als „schwarzes Brett“ für die Veröffentlichung und Sammlung von Informationen verwendet. Daher erfolgt eine Auswahl geeigneter Datenübertragungstechnologien sowie die Modellierung und Implementierung einer verteilten Blackboard-Architektur. Mit der Einführung derart zellulärer Fördertechnik geht eine Dezentralisierung der Datenhaltung einher. Eine prozessnahe, dezentrale Datenhaltung unterstützt wiederum die Beherrschung der Komplexität in der Logistik [Hom-2004, Hom-2006b, Sch-2007].

### **Angestrebte Forschungsergebnisse**

Das Vorhaben hat zum Ziel, eine Testumgebung für die oben beschriebenen Aufgaben eines Transportsystems auf der Basis autonomer mobiler Roboter sowie eine leistungsfähige Kommunikationsinfrastruktur für zellulare Transportsysteme zu schaffen. Vor diesem Hintergrund werden angepasste Kommunikationsstrukturen und Algorithmen im Simulationsbetrieb getestet. Damit wird der Funktionsnachweis für den Einsatz derartiger Systeme zur Lösung von Transportaufgaben erbracht. Zudem werden die Modelle mit ihren Parametern optimiert, damit basierend auf den Simulationsergebnissen derartige Systeme in der Realität gebaut werden können.

Eine Definition der Fahrzeugeigenschaften stellt die Grundvoraussetzung der Entwicklung praxisgerechter Algorithmen für den Betrieb einer fördertechnischen Anlage auf der Basis eines kooperierenden Fahrzeugkollektivs dar. Hierzu zählen die Kinematik und das Prinzip des Lastaufnahmemittels. Nach der Festlegung dieser Voraus-

setzungen werden Modelle und Algorithmen sowie eine angepasste Kommunikationsinfrastruktur entworfen. Die einzelnen wissenschaftlich-technischen Ergebnisse werden gemäß dem Projektverlauf in folgenden Abschnitten vorgestellt:

**Anforderungsanalyse:** Anhand eines Referenzszenarios erfolgt zunächst die Bestimmung einzelner Prozessschritte, für die der Einsatz zellulärer Fördertechnik in Frage kommt. Die prozessbedingten Anforderungen an die Fördertechnik werden analysiert und beeinflussen die Kommunikations- und Steuerungskonzepte. Zudem werden die Möglichkeiten eines bereichsübergreifenden Einsatzes zellulärer Fördermittel eruiert. Die autonomen Fahrzeuge lassen sich beispielsweise je nach Auftragslast sowohl im Warenein-/ausgang als auch in der Lagervorzone einsetzen. Die erzielten Ergebnisse werden im Abschnitt 3 vorgestellt.

**Modellbildung und Simulation:** Um die zu entwickelnden Steuerungsalgorithmen in einer Simulationsumgebung realitätsnah testen zu können, wird zunächst für die Schwarmfahrzeuge ein physikalisches Modell entwickelt, das die Kinematik des Fahrzeuges und dessen Dynamik berücksichtigt. Insbesondere Maschinendaten wie Rad- und Achsabstand sind parametrierbar. Auf dieser Basis erfolgt die Entwicklung und Optimierung des Regelungskonzepts für das Fahrzeug. Für das Fahrzeug als Träger der Sensoren muss in dem Modell auch die geometrische Anordnung der Sensoren berücksichtigt werden, weshalb diese ebenfalls modelliert werden. Die Simulationsumgebung besteht aus einer Halle mit feststehenden Hindernissen und frei definierbaren Lastaufnahme- und Lastabgabestationen. In dieser Umgebung kann eine vorzugebende Anzahl von Fahrzeugmodellen mit parametrierbaren Sensormodellen frei verfahren. Dabei können die Fahrzeuge beispielsweise lokale Ausweichmanöver fahren und in Kooperation mit ihren Nachbarfahrzeugen vorausschauend ausweichen, Konfliktsituationen vermeiden oder Deadlocksituationen auflösen. Die erzielten Ergebnisse werden im Abschnitt 4 vorgestellt.

**Algorithmen:** Die untersuchten Steuerungsalgorithmen beziehen sich auf den Betrieb eines Kollektivs von Fahrzeugen. Die Modelle und der Simulator aus dem vorangegangenen Abschnitt verfügen über Schnittstellen, die eine einfache Einbindung der Algorithmen erlauben. Damit steht ein Rahmen zur Verfügung, der auch nach Abschluss des Vorhabens Anpassungen und Optimierung der Algorithmen erlaubt. Im Zusammenhang mit der Navigation werden die Sensoren, die für die Kollisions-

vermeidung eingesetzt werden, auch zur Unterstützung der Kursbestimmung eingesetzt. Auf diese Weise entsteht durch Sensorfusion in Verbindung mit einer grobmaschigen Absolutnavigation ein kostengünstiges Navigationssystem. Trotz optimierter Wege und Implementierung eines autonomen Ausweichverhaltens kann es zu Deadlocksituationen kommen, welche von den Fahrzeugen erkannt und aufgelöst werden sollen. Die Auftragszuweisung an einzelne Fahrzeuge kann durch ein verteiltes Dispositionsverfahren auf der Basis der Blackboard-Implementierung erfolgen. Die erzielten Ergebnisse werden im Abschnitt 5 vorgestellt.

**Datenanalyse und Kommunikationsinfrastruktur:** In diesem Schritt wird der für den Betrieb eines Fahrzeugkollektivs notwendige Informationsaustausch untersucht. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden für verschiedene Steuerungsstrukturen (zentral/hierarchisch/dezentral) geeignete Kommunikationskonzepte entwickelt. Für eine sinnvolle Datenverteilung innerhalb eines Materialflusssystems werden die vorhandenen Informationen zunächst analysiert und klassifiziert. Anschließend erfolgt die Auswahl geeigneter Kommunikationstechnologien, Protokolle und Datenformate. Die erzielten Ergebnisse werden im Abschnitt 6 vorgestellt.

**Informationsknotenpunkte:** Erfolgt die Steuerung des Fahrzeugkollektivs dezentral, so soll die Speicherung und Bereitstellung echtzeitkritischer und auf den Wissensbedarf einzelner Bereiche zugeschnittener Informationen von effizienten und anlagen nahen Instanzen übernommen werden. Daher werden auf Grundlage der zuvor festgelegten Technologien, Protokolle und Datenformate dezentrale Informationsknotenpunkte entwickelt, die nach dem Modell einer Schultafel bzw. eines Schwarzen Bretts (Blackboard) als Datenaustauschplattform für die autonom agierenden Fahrzeuge fungieren. Durch die Entkopplung von Sender und Empfänger führt dies zu einer Verringerung der Systemkomplexität. Jedes Modul ist für seine eigene Aufgabe und die Beschaffung bzw. Veröffentlichung der relevanten Daten selbst zuständig. Ein Informationsknotenpunkt ist dabei so gestaltet, dass er beliebige Daten aufnehmen und bereitstellen kann sowie Grundfunktionalitäten zur Datenverwaltung bietet. Durch eine Verteilung der Datenaustauschplattform werden die bekannten Nachteile zentraler Blackboards in Bezug auf die Robustheit des Gesamtsystems und der Performance eliminiert. Die erzielten Ergebnisse werden im Abschnitt 7 vorgestellt.

**Validierung:** Abschließend werden sämtliche Funktionen der autonomen Fahrzeuge inklusive der Fahrzeuglogik anhand von Fahrzeugmodellen und autonomen Softwareprogrammen überprüft. Die rein softwarebasierten Demonstratoren werden in Form von Simulationsmodellen an den Forschungsstellen eingerichtet und zeigen die Potenziale und Grenzen einer Zellularen Fördertechnik auf. Für eine spätere Nutzung der Ergebnisse sind nach diesem Projekt firmen- und produktspezifische Anpassungen erforderlich, da die Validierungsphase nur das grundsätzliche Zusammenspiel der Algorithmen, Modelle und der Kommunikationsstruktur aufzeigt. Die erzielten Ergebnisse werden im Abschnitt 8 vorgestellt.

### **Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse**

Die konventionellen, spurgeführten Fahrerlosen Transportsysteme (FTS) bieten bereits ein hohes Maß an Flexibilität, das durch die Erkenntnisse aus diesem Vorhaben wesentlich erweitert wird. Der Ansatz, zunächst in einer Simulationsumgebung die Integration einer Vielzahl von Fahrzeugen durchzuführen, ermöglicht eine aufwandsarme Untersuchung verschiedener Systemvarianten und -parameter. Die offenen Modelle erlauben es, andere Sensorsysteme und Fahrzeuge mit einer anderen Kinematik und einer anderen Dynamik zu untersuchen. Das Forschungsvorhaben, auf dem der vorliegende Bericht basiert, schafft somit die Voraussetzungen für Realisierungsprojekte, in denen innerbetriebliche Transportaufgaben mit frei auf der Fläche verfahrbaren Fahrzeugen umgesetzt werden. Dieses innovative Materialflusskonzept erfordert entsprechende Steuerungs- und Kommunikationsstrukturen sowie angepasste Algorithmen, die für derartige Anwendungen zuvor noch nicht untersucht worden sind. Die Basistechnologie der verteilten Steuerung eines solchen Systems besitzt auch über dieses Projekt hinaus eine große Bedeutung bei der dezentralen Koordinierung logistischer Prozesse, deren Potenziale u.a. im Rahmen des BMBF-Projekts „Internet der Dinge“ (vgl. Abschnitt 2.2) erfolgreich nachgewiesen wurden [Gün-2010a].

## 2 Stand der Technik und Forschung

Bei der angestrebten Gestaltung von Steuerungsalgorithmen und Kommunikationssystemen für ein autonom agierendes Kollektiv von Transportfahrzeugen kann auf etablierte Lösungen (z.B. Algorithmen, Standards, Werkzeuge) verschiedener Fachdisziplinen und Forschungsgebiete zurückgegriffen werden. Daher beleuchtet der folgende Abschnitt den Stand der Technik und Forschung auf dem Gebiet autonomer mobiler Roboter (Abschnitt 2.1), verschiedener Modelle der Materialflusssteuerung (Abschnitt 2.2) sowie von Konzepten der Datenübertragung in Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) und in der Car-to-X-Kommunikation, welche als Grundlage eines Kommunikationskonzepts für Zellulare Transportsysteme herangezogen werden können (Abschnitt 2.3).

### 2.1 Autonome mobile Roboter

Im Mittelpunkt dieses Vorhabens stehen autonome mobile Roboter. Autonome mobile Roboter bewegen sich frei in der Umgebung und kommen somit den Fahrzeugen einer Zellularen Fördertechnik am nächsten. Die hierzu existierende Literatur deckt insbesondere die Aufgaben der Navigation, der Kollisionsvermeidung und der verhaltensbasierten Programmierung ab [Sch-2004]. Die meisten Applikationen liegen für genau ein Fahrzeug oder eine kleine Gruppe von Fahrzeugen vor. Ziele der Untersuchungen sind Erkundung der Umgebung [Ste-2002], der Einsatz als Serviceroboter (Staubsauger, Gebäudeinspektion) und wettbewerbsorientierte Anwendungen (RoboCup) mit einem spielerischen Charakter [Mar-2010]. Zielgerichtete Präzisionsfahrten für Gruppen von Robotern werden bisher nicht beschrieben.

Im Rahmen der Weltausstellung Expo 2000 in Hannover wurde vom Fraunhofer IML als Umsetzung eines künstlerischen Gesamtkonzeptes ein Schwarm von 72 kooperierenden mobilen Robotern realisiert [Alb-2010]. Die Aufgabe bestand unter anderem in der Bildung von Subschwärmen aus sechs bis zwölf Robotern, Schwarmwechsel einzelner Roboter nach vorgegebenen Regeln und dem autonomen Ausweichen vor den Besuchern. Das dabei eingesetzte Ortungssystem aus ortsfesten Kameras erfüllte die Anforderungen, erwies sich aber als teuer und aufwendig bezüglich Beschaffung und Installation. Im Vorfeld wurden die Algorithmen in einem

eigens hierzu entwickelten Simulator getestet. Diese Vorgehensweise erwies sich als besonderes effektiv, da das Testen mit einem physischen Roboterschwarm wegen der großen Anzahl an Einzelfahrzeugen sehr zeitintensiv ist. Dieses Vorgehen liegt daher auch dem hier vorgestellten Forschungsvorhaben zugrunde.

Im folgenden Abschnitt soll zunächst eine Klassifizierung unterschiedlicher Roboterarten erfolgen. In diesem Zusammenhang wird nach weiteren Erkenntnissen aus Teilgebieten der Robotik gesucht, die auf die Fragestellungen des Projekts übertragbar sind. Ein weiterer Abschnitt widmet sich aktuellen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet autonomer mobiler Transportfahrzeuge für die Intralogistik.

### 2.1.1 Klassifizierung von Robotern

Innerhalb der Automatisierungstechnik hat das Forschungsgebiet der Robotik bei Themen wie Autonomie, Lernfähigkeit und Umfelderkennung eine Vorreiterrolle inne. Daher können Erkenntnisse dieses Fachgebiets auch bei der Gestaltung der Steuerung und der Kommunikation eines autonomen Fahrzeugschwarms Verwendung finden. Dieser Abschnitt bietet eine kurze Einführung in folgende Anwendungsgebiete der Robotik:

- Industrieroboter
- Humanoide Roboter
- Spielroboter
- Erkundungs-/Bergungsroboter
- Mobile Serviceroboter

Die behandelten Anwendungsfelder der Robotik können allerdings nur einen groben Überblick über dieses sehr vielseitige Themengebiet liefern.

#### **Industrieroboter**

Industrieroboter sind meist fest installiert und in ihrer Form und Funktion auf spezielle Einsatzgebiete festgelegt (Abbildung 2-1). Industrieroboter gehören daher nicht der Klasse der autonomen mobilen Roboter an. Grundsätzliche Funktionseinheiten bilden Manipulator (beweglicher Teil des Roboteraufbaus), Steuerung und Effektor (Werkzeug, Greifer, etc.). Um autonom Bearbeitungsschritte durchführen zu können, werden Industrieroboter auch vermehrt mit Sensoren ausgerüstet. Ausprägungen der

Industrieroboter sind Schweiß-, Schneid-, Füge-, Mess-, Lackier- und Schleifroboter oder Handhabungseinrichtungen wie Palettierer, Bestück- und Entnahmeroboter.



**Abbildung 2-1: Schweißroboter (l.) und Palettierer (Bildquelle: KUKA)**

### **Humanoide Roboter**

Humanoide Roboter orientieren sich in ihrem Aufbau an der menschlichen Anatomie und sind daher meist als Laufroboter ausgeführt. Menschliche Bewegungsabläufe und den Gleichgewichtssinn nachzubilden stellt in dieser Disziplin die größte Herausforderung dar. Außerdem soll auch die sensorische Ausstattung dem menschlichen Vorbild gleichen (Augen zur visuellen Wahrnehmung, Finger für den Tastsinn, etc.). Bekannte Vertreter dieser Roboterart sind der HRP-3 (Kawada Industries) und ASI-MO (Honda). In Abbildung 2-2a/c erkennt man den humanoiden Aufbau der Roboter mit Gliedmaßen, Gelenken und Kopf.

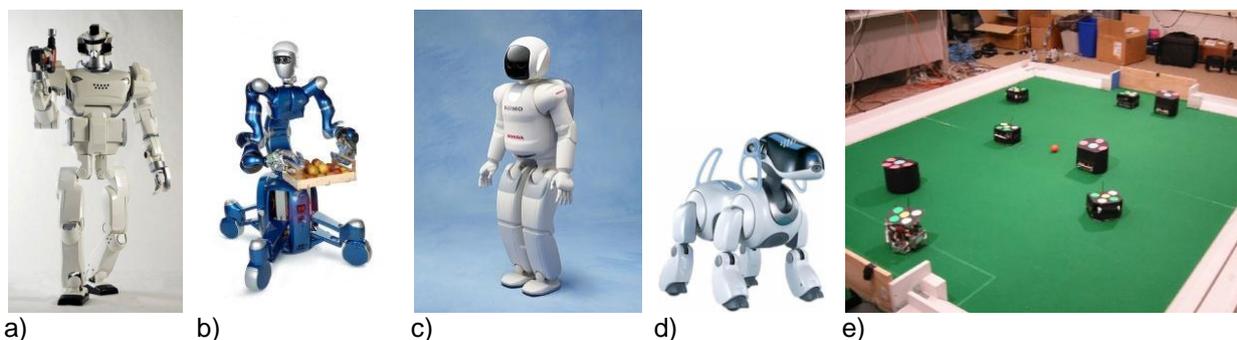
Eine etwas andere Bauart findet sich beim mobilen Robotiksystem Rollin' Justin (Abbildung 2-2b), entwickelt vom Institut für Robotik und Mechatronik des DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt). Hier ist der Torso mit zwei Leichtbauarmen auf einer mobilen Plattform mit vier unabhängig steuerbaren Rädern angebracht. Der Fokus liegt somit auf Handhabungsaufgaben, nicht auf der Problemstellung des menschlichen Laufens. Die Roboterarme wurden von der Firma KUKA als Leichtbauroboter (LBR) in ein Produkt überführt [KUK-2012]. Dies ist ein gelungenes Beispiel für die Integration von Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der Robotik in industrielle Anwendungen.

### **Spielroboter**

Als Spielroboter bezeichnet man Roboter, deren automatisierter Funktionsumfang primär keinerlei arbeits- oder forschungstechnischen Nutzen hat. Ein bekanntes Bei-

spiel hierfür ist der einem Hund ähnelnde Spielroboter Aibo von Sony (Abbildung 2-2d), der mittlerweile allerdings nicht mehr produziert wird.

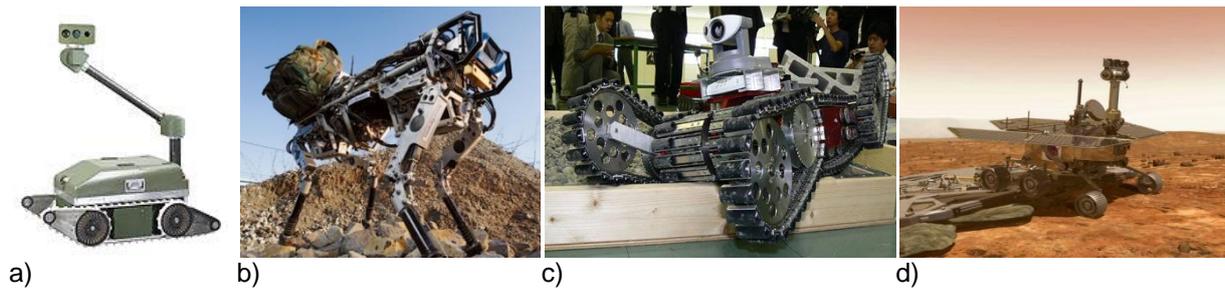
Auch die mobilen Roboter, die sich bei den Konkurrenzveranstaltungen RoboCup und der von der Federation of International Robot-Soccer Association (FIRA) ausgerichteten Weltmeisterschaft im Roboterfußball messen, sind prinzipiell als Spielroboter zu bezeichnen. Allerdings wird zur Entwicklung und Verbesserung der Roboter auch wichtige Grundlagenforschung bezüglich der Umfeld- und Objekterkennung in Echtzeit und der Kommunikation innerhalb der Roboterteams geleistet. Abbildung 2-2e zeigt das beim RoboCup verwendete Spielfeld. Die Roboter müssen darauf ohne weitere Hilfsmittel navigieren, indem sie die Begrenzungen des Spielfeldes und die Farben der Tore erkennen. Die Roboterteams bestehen entweder aus humanoiden Laufrobotern oder aus mobilen Robotern mit Fahrwerk.



**Abbildung 2-2: Humanoide Roboter: HRP-3 (a), Rollin' Justin (b), ASIMO (c); Spielroboter Aibo (d); Spielfeld beim RoboCup (e) (Bildquellen: Kawada, DLR, Honda, Sony, RoboCup)**

### Erkundungs-/Bergungsroboter

Zur Erkundung von für den Menschen unzugänglichen, gefährlichen oder schwer erreichbaren Orten finden ferngesteuerte oder autonome Spezialroboter Einsatz [Mar-2012a]. Einsatzgebiete der Spezialroboter sind einerseits militärische Missionen, wie z.B. die unbemannte Aufklärung von strategisch wichtigen Gebieten sowie Materialtransporte in unwegsamem Gelände (Abbildung 2-3a/b) [Mar-2006b], aber auch humanitäre Aufgaben, wie die Suche nach Verschütteten in Erdbebengebieten (Abbildung 2-3c). In der Raumfahrt finden mobile Roboter ihren Einsatz bei Mond- und Marsmissionen, um vor Ort selbstständig Erkundungsfahrten durchzuführen und die Ergebnisse an die Erde zu senden (Abbildung 2-3d).



**Abbildung 2-3: Asendro Scout (a); BigDog (b); Hibiscus (c); Mars Rover Spirit (d) (Bildquellen: Robowatch, Boston Dynamics, Chiba Institute, NASA)**

### Mobile Serviceroboter

Die Aufgaben von mobilen Servicerobotern liegen in der Unterstützung alter und behinderter Menschen im Alltag, in der Entlastung des Menschen von Routinetätigkeiten (z.B. Hol- und Bringdienste, Reinigungs- und Wartungsarbeiten) und bei Einsätzen in menschenfeindlichen und schwerzugänglichen Umgebungen (z.B. Kanalinspektionen, Wartungsarbeiten in Atomkraftwerken). Auch die Fahrzeuge einer Zellularen Fördertechnik sind in dieses Feld der mobilen, autonomen Serviceroboter einzuordnen. Abbildung 2-4 zeigt exemplarisch zwei ganz unterschiedliche Anwendungen von Servicerobotern. Der Reinigungsroboter RoboCleaner 3000 von der Firma Kärcher hat es schon zur Marktreife gebracht, während bis zum Einsatz von Pflege-Roboter in der Betreuung von Alten und Behinderten noch einige technische sowie soziale Hürden zu überwinden sind [Kär-2006, Cre-2006].



**Abbildung 2-4: RoboCleaner 3000 (l.); Pflegeroboter RI-MAN (Bildquellen: Kärcher, Riken)**

#### 2.1.2 Mobile Transportroboter in der Intralogistik

In Form von Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF, engl.: Automated Guided Vehicle, AGV) sind bereits seit den 1960er Jahren mobile Roboter in Prozessen der Intralogistik im Einsatz [Hep-2007]. Nehmzow sieht in Fahrerlosen Transportfahrzeugen die am weitest verbreitete Ausprägung mobiler Roboter [Neh-2002, S. 8]. In den ver-

gangenen Jahren ist ein Trend hin zu mehr Autonomie der Fahrerlosen Transportfahrzeuge sowie zu dezentral gesteuerten Shuttlesystemen zu erkennen, welche ebenfalls in die Kategorie der mobilen Transportroboter eingeordnet werden können. Dieser Abschnitt stellt kurz den Aufbau und die Einsatzfelder von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) vor und zeigt anschließend den Stand der Forschung und Technik im Bereich autonomer Transportroboter für den Einsatz in der Intralogistik auf.

### **Fahrerlose Transportsysteme (FTS)**

Die VDI-Richtlinie 2510 definiert Fahrerlose Transportsysteme (FTS) als „innerbetriebliche, flurgebundene Fördersysteme mit automatisch gesteuerten Fahrzeugen, deren primäre Aufgabe der Materialtransport [...] ist“ [VDI2510]. Fahrerlose Transportsysteme bestehen i.d.R. aus

- einem oder mehreren Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF),
- einer Leitsteuerung und Kommunikationseinrichtung,
- einem Navigationssystem,
- Warn- und Sicherheitseinrichtungen sowie
- Infrastruktur und peripheren Einrichtungen (z.B. Tore, Übergabepunkten).

Eine umfangreiche Übersicht über die geschichtliche Entwicklung der Fahrerlosen Transportsysteme, den aktuellen Stand der Technik sowie moderne Anwendungsgebiete findet sich in [Ull-2011].

Das Einsatzfeld von Fahrerlosen Transportsystemen reicht von der einfachen Güterverteilung bis hin zu komplexen, rechnergesteuerten Transport- und Montagesystemen. Die konstruktive Gestaltung der Fahrerlosen Transportfahrzeuge orientiert sich am jeweiligen Anwendungsfall und weist daher eine hohe Variantenvielfalt auf. Neben automatisierten Schleppzügen gibt es Hubgabel-FTF (Heben und Transportieren von Lasten), FTF mit integrierten Rollenbahnen (Transport von Paletten oder Kleinladungsträgern), Unterfahrschlepper-FTF (Transport von Rollcontainern) oder FTF-Tambourtransporter (Transport von Papier- oder Kartonrollen). Auch im Outdoor-Bereich werden speziell entwickelte FTF mit entsprechenden Antriebs- und Führungstechniken für innerbetriebliche Transporte eingesetzt [Ull-2006].

Ein weiteres interessantes Anwendungsgebiet, in dem sich der Einsatz von Fahrerlosen Transportsystemen mittlerweile etabliert hat, ist der Warentransport innerhalb großer Krankenhäuser [Hep-2007]. Fahrerlose Transportfahrzeuge stellen hier den

Versorgungsstrom für Essen, Medikamente, Wäsche und Post sicher oder entsorgen Müll, Geschirr und Schmutzwäsche. Zum Einsatz kommen automatisierte Unterfahrschlepper, die spezielle Transportcontainer aufnehmen und bewegen können.

Ein besonders komplexes Einsatzfeld für Fahrerlose Transportsysteme mit hohen Anforderungen an Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit stellen Produktions- und Montageprozessen dar. Typische Aufgaben sind hier die Verknüpfung von Bearbeitungsmaschinen und Arbeitsplätzen sowie die Verwendung der Fahrerlosen Fahrzeuge als „Mobile Werkbank“.

In all diesen Einsatzfeldern bewegen sich die Fahrerlosen Transportfahrzeuge auf vom Menschen vorgegebenen Fahrwegen. Abbildung 2-5 zeigt eine Einordnung von Fahrerlosen Transportfahrzeugen aus Sicht mobiler flurgebundener Systeme, wie sie in der VDI-Richtlinie 2510 „Fahrerlose Transportsysteme (FTS)“ vorgenommen wird [VDI2510].

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

**Abbildung 2-5: Systematik der mobilen flurgebundenen Systeme [VDI2510]**

Eine Zellulare Fördertechnik besteht gemäß dieser Einordnung aus autonomen Robotern, denen zwar Zielpunkte, nicht aber die genauen Fahrwege vorgegeben werden. Unter der Bezeichnung openTCS wurde am Fraunhofer IML gemeinsam mit einem Konsortium aus Industrieunternehmen und weiteren Forschungsinstituten ein universell einsetzbares Leitsystem für Fahrerlose Transportfahrzeuge entwickelt [FAH-2003]. Das System beinhaltet u.a. Algorithmen für die Auftragsdisposition und die Verkehrsregelung, die als Grundlage für die zu entwickelnden Steuerungsalgorithmen genutzt werden können. Allerdings setzt openTCS spurgeführte Fahrzeuge voraus und ist als zentrale Leitsteuerung ausgeführt.

### **Autonome mobile Transportroboter**

Gerade die zentrale Fahrzeugsteuerung mit vorgegebenen Fahrwegen soll aber in zukünftigen innerbetrieblichen Transportsystemen weitgehend durch neuartige Systeme überwunden werden, die über ein hohes Maß an Autonomie bei der Navigation und der Entscheidungsfindung verfügen. Ein aktueller Trend in der Intralogistik geht in Richtung selbststeuernder, kleinskaliger Fahrerloser Transportfahrzeuge und deren Einsatz in Verbänden aus vielen baugleichen Einzelfahrzeugen.

So transportieren im Kiva Mobile Fulfillment System kleine Fahrroboter mobile Lagerregale direkt zum Kommissionierarbeitsplatz [Gui-2008]. Mittlerweile hat das Internethandelsunternehmen Amazon Interesse am Lagerroboterhersteller Kiva Systems bekundet und wird diesen voraussichtlich im zweiten Quartal 2012 übernehmen [GOL-2012]. Das System ist allerdings auf eine umfangreiche Infrastruktur zur Wegfindung angewiesen und benötigt eine zentrale Steuerung.



**Abbildung 2-6: Kiva Mobile Fulfillment System (Bildquelle: Kiva)**

Im Bereich der Forschung beschäftigen sich mehrere Forschungsstellen der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL, [www.wgtl.de](http://www.wgtl.de)) mit der technischen Umsetzung selbststeuernder Fahrzeugkonzepte, die mit einem Mindestmaß an Infrastruktur auskommen und im Kollektiv fördertechnische Aufgaben übernehmen. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang die Projekte BInE (Basic Intralogistic Element), Flexförderer sowie KARIS (Kleinskaliges Autonomes Redundantes IntralogistikSystem, [Hip-2009]) am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Während es sich bei BInE und KARIS um mobile Transportroboter handelt (vgl. Abbildung 2-7), stellt der FlexFörderer ein modular aufgebautes, ortsfestes Stetigfördersystem dar, welches komplett dezentral gesteuert wird [May-2009].



**Abbildung 2-7: BInE (Basic Intralogistic Element, I.) und KARIS (Kleinskaliges Autonomes Redundantes IntralogistikSystem) (Bildquelle: IFL, Karlsruhe)**

Am Institut für Fördertechnik (IFT) der Universität Stuttgart werden aktuell zwei Fördersysteme (vgl. [Weh-2012a, Weh-2012b]) entwickelt, die den Transport von Kleinladungsträgern (KLT) bzw. Großladungsträgern (GLT) ermöglichen (vgl. Abbildung 2-8). Das KLT-Transportsystem KaTe (Kleine Autonome Transporteinheit) ist optisch spurgeführt.



**Abbildung 2-8: Konzepte KaTe (Kleine Autonome Transporteinheit, I.) und Doppelkufensystem (Bildquelle: IFT, Stuttgart)**

Am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) der Leibniz Universität Hannover wird im Rahmen des EFRE-Projekts „CogniLog“ eine dezentrale Steuerung von Unstetigförderern mittels einer kooperativen adaptiven Ablaufsteuerung am Beispiel von Transportfahrzeugen in einem Cross-Docking-Zentrum untersucht [Hei-2011a]. Darüber hinaus beschäftigt sich ein aktuelles Projekt am ITA mit der dezentrale, agentenbasierten Selbststeuerung von FTS [Ove-2011]. Die Ergebnisse dieses Projekts stehen allerdings voraussichtlich erst im Jahr 2013 zur Verfügung und können daher im vorliegenden Projekt keine Berücksichtigung finden.

Ebenfalls den mobilen Transportrobotern zugeordnet werden können Shuttlesysteme, welche zunehmend Einsatz in Automatischen Kleinteilelagern (AKL) finden [Hei-2011b]. Shuttlesysteme bestehen aus schienengebundenen Fahrzeugen (Shuttles) mit integriertem Lastaufnahmemittel, die sich horizontal in den Lagerebenen bewegen können, sowie aus Hubstationen oder Aufzügen für vertikale Bewegungen. Die

einzelnen Shuttles sind je nach Ausführung entweder an eine Ebenen gebunden und übergeben das Transportgut direkt an einen Aufzug, oder sie sind in der Lage, über Vertikalförderer zwischen den einzelnen Lagerebenen zu wechseln. Im Gegensatz zu Fahrzeugen einer Zellularen Fördertechnik sind Shuttles an Schienen gebunden und navigieren somit in einem fest vorgegebenen Wegenetz. Allerdings ist die Selbststeuerung bei diesen Systemen teils schon sehr ausgereift.

So nutzt das System der Firma Servus Intralogistics<sup>2</sup> das sogenannte Manhattan-Prinzip zur autonomen Navigation [NN-2011]. Die Fahrzeuge orientieren sich dabei im System analog zu New Yorker Taxifahrern, die sich im Straßennetz Manhattans zurechtfinden müssen. Über die Manhattanlogik finden sie zum jeweils richtigen Ziel und dies ohne Kenntnis der Gesamtanlage. Jeder Lagerplatz, jede Weiche, jeder Lift und jeder Montageplatz hat eine eindeutige Adresse, die einer im System allgemein bekannten Nomenklatur folgt. Die Fahrzeuge dieses Systems werden als „Autonomous Robotic Carrier (ARC)“ bezeichnet [Jun-2011]. Diese Bezeichnung weist auf die immer fließenderen Grenzen zwischen Fördertechnik und Robotik hin. Ein ebenfalls modular aufgebautes und dezentral gesteuertes Shuttlesystem wurde von der Firma Dematic in Kooperation mit dem Fraunhofer IML unter dem Name Multishuttle® entwickelt [Jun-2004, Sch-2005]. Das Multishuttle-System ist spurgeführt und die Steuerung der einzelnen Fahrzeuge erfolgt durch ein Multiagentensystem. Beide Systeme sind in Abbildung 2-9 dargestellt.



**Abbildung 2-9: Autonomous Robotic Carrier ARC2 (l.) und Dematic Multishuttle® (Bildquellen: Swisslog, Dematic)**

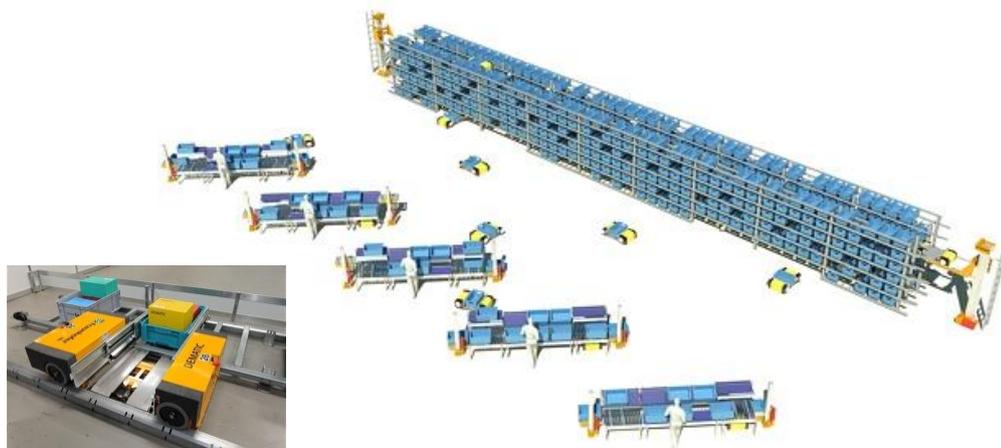
Einige der vorgestellten Systeme weisen bereits grundlegende Eigenschaften Zellularer Transportsysteme (vgl. Abschnitt 1.2) wie beispielsweise Layoutflexibilität oder

---

<sup>2</sup> Joint-Venture der österreichischen Heron-Gruppe und der Schweizer Swisslog AG

einfache Skalierbarkeit auf. Allerdings existiert derzeit noch kein fördertechnisches System, das sämtliche Attribute Zellularer Transportsysteme in sich vereint.

Unter der Bezeichnung Multishuttle Move wird allerdings aktuell (Stand: Januar 2012) von Dematic gemeinsam mit dem Fraunhofer IML ein System entwickelt, das einem Zellularen Transportsystem sehr nahe kommt [Kam-2011]. Es handelt sich um ein multimodales Shuttlesystem, bei dem die Shuttlefahrzeuge sowohl über ein Regal- als auch ein Bodenfahrwerk verfügen. Die Transportfahrzeuge ersetzen somit einerseits konventionelle, fest installierte Fördertechnik in der Lagervorzone, können sich andererseits aber auch in den Lagerebenen bewegen. Die Shuttles können Kleinladungsträger mit den Abmessungen 600 x 400 mm mit einem Gewicht von bis zu 40 Kilogramm aufnehmen und diese frei in der Fläche verfahren beziehungsweise in eine Regalanlage einbringen. Somit kann z.B. der komplette Materialfluss zwischen Lagerfächern und Kommissionierstationen realisiert werden. Dieses Szenario wurde in der Versuchshalle am Fraunhofer IML mit 50 Shuttlefahrzeugen als reales System aufgebaut (vgl. Abbildung 2-10) und wird dort derzeit getestet und weiterentwickelt.



**Abbildung 2-10: Multishuttle Move (Bildquellen: IML, Dematic)**

### **Grenzen der Robotik**

Neben den großen technischen Herausforderungen, die mit der Selbststeuerung und freien Navigation mobiler Roboter verbunden sind, gilt es auch Vorbehalte seitens der potenziellen Nutzergruppen derartiger Systeme zu berücksichtigen. So zitiert Geert-Jan Kruijff, Leiter des Projekts NIFTI (Natural human-robot cooperation in dynamic environments), in einem Interview mit dem Magazin c't Professor Satoshi Ta-

dokoro vom International Rescue Systems Institute der Universität Tohoku, Sendai: „Satoshi Tadokoro hat angeregt, das Kürzel AI zukünftig nicht für „artificial intelligence“ (künstliche Intelligenz) zu verwenden, sondern für „accepted intelligence“ – eine Intelligenz, die für den Nutzer akzeptierbar ist. Sein Forschungsteam hatte beobachtet, dass die Nutzer autonomes Verhalten von Robotern nicht mögen. [...] Der Grund für die Ablehnung liegt in der fehlenden Transparenz des Roboterverhaltens. Den Anwendern war nicht klar, was der Roboter als Nächstes tun würde und warum“ [Mar-2012b].

Dieses Akzeptanzproblem lässt sich auf andere Anwendungsgebiete der Robotik übertragen. So ist auch bei der angestrebten agentenbasierten Selbststeuerung von Materialflusssystemen die zu erwartende Skepsis von Anlagenbetreibern zu berücksichtigen. Entsprechende Monitoringwerkzeuge, die das Systemverhalten nachvollziehbar darstellen, sowie angepasste Kennzahlensysteme, die wichtige Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit, Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit dezentral gesteuerter Anlagen ermöglichen, sind als Voraussetzung für eine Überwindung dieser Skepsis zu sehen. Erste Lösungsansätze bezüglich der formulierten Problemstellung sind aktuell Gegenstand der Forschung (vgl. [Nop-2011, May-2010]), sind aber nicht Teil des Forschungsprojekts, das dem vorliegenden Bericht zugrunde liegt.

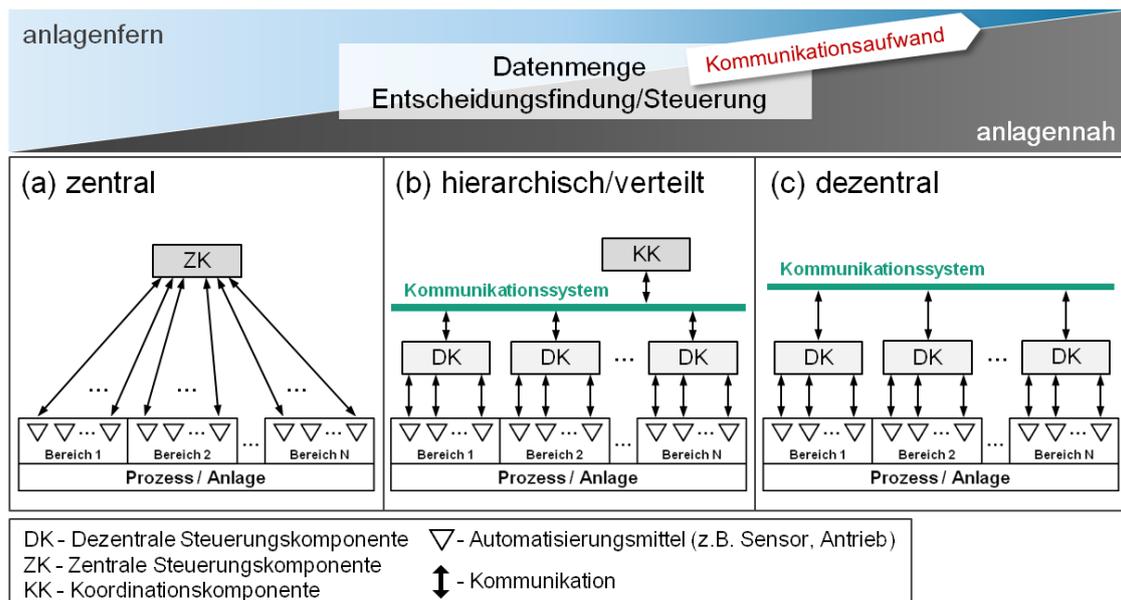
### **2.2 Modelle der Materialflussteuerung**

Für die Steuerung von Materialflusssystemen existieren verschiedene Modellierungsansätze. Diese Ansätze der Steuerungsorganisation lassen sich grob in drei Kategorien einteilen (vgl. Abbildung 2-11):

- Zentrale Steuerungsstruktur
- Dezentrale Steuerungsstruktur
- Hierarchische (verteilte) Steuerungsstruktur

Zentrale Steuerungsstrukturen spielen aufgrund der Konzentration komplexer Funktionen in einem Steuerrechner und der damit verbundenen Starrheit der Steuerungsorganisation in heutigen Materialflusssystemen kaum mehr eine Rolle, während hierarchische Strukturen am weitesten verbreitet sind [vgl. Lib-2011, S.12]. Auch hierarchisch aufgebaute Steuerungssysteme verfügen über dezentrale Steuerungskomponenten. Diese werden allerdings durch übergeordnete Einheiten (z.B. Materialflus-

rechner) koordiniert [Jün-1998]. Eine komplett dezentrale Steuerungsorganisation verspricht Vorteile hinsichtlich Flexibilität, Skalierbarkeit und Robustheit, bringt aber auch neue Herausforderungen mit sich. So müssen sich die dezentralen Steuerungskomponenten in verschiedenen Kontexten (z.B. unterschiedliche Topologien, schwankende Auftragsaufkommen, Nichtverfügbarkeit von Teilsystemen) ohne zentrale Koordination effizient verhalten [Hei-2011a].



**Abbildung 2-11: Zentrale (a), hierarchische/verteilte (b) und dezentrale (c) Steuerungsorganisation (in Anlehnung an [Jün-1998, S. 142])**

Der folgende Abschnitt stellt exemplarisch das 2008 zurückgezogene VDMA-Einheitsblatt 15276 „Datenschnittstellen in Materialflusssystemen“, den VDI/VDMA-Richtlinienentwurf 5100 „Softwarearchitektur für die Intralogistik (SAIL)“ sowie ein Steuerungsprinzip im Sinne des Internet-der-Dinge-Ansatzes [Hom-2006a] vor. Die Betrachtung dieser unterschiedlichen Konzepte ist für das vorliegende Forschungsvorhaben von zentraler Bedeutung, da das genutzte Steuerungsprinzip sowohl Einfluss auf die erforderliche Komplexität der anlagennahen Algorithmen als auch auf die Struktur des Kommunikationssystems hat, wie Abbildung 2-11 verdeutlicht.

### 2.2.1 VDMA 15276 – Datenschnittstellen in Materialflusssystemen

Wie erwähnt gliedern sich herkömmliche Materialflusssysteme meist hierarchisch. So gibt das 2008 zurückgezogene VDMA-Einheitsblatt 15276 [VDMA15276]

eine Steuerungsarchitektur bestehend aus insgesamt sechs Ebenen mit festgelegten Funktionalitäten und Schnittstellen vor:

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

Die Aufteilung der Steuerungsfunktionen auf verschiedene Ebenen legt allerdings nicht fest, auf welcher Hardware die einzelnen Funktionen umgesetzt werden. Abhängig von Einsatzfeld und Komplexität einer Materialflussanlage können mehrere Ebenen kombiniert und auf derselben Hardware implementiert werden (vgl. Abbildung 2-12).

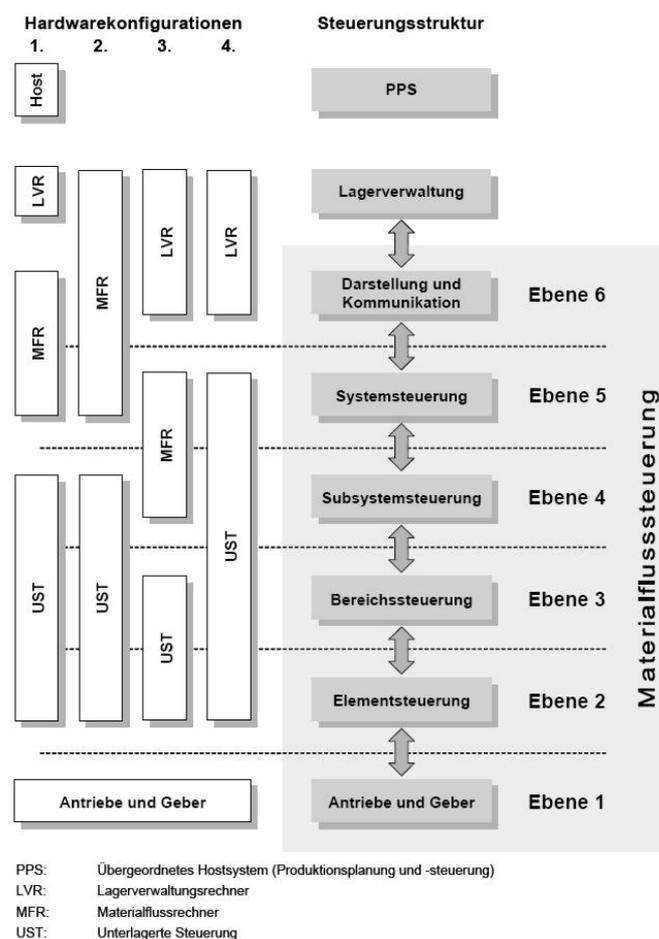


Abbildung 2-12: Hardwarekonfiguration und Steuerungsstruktur der Materialflusssteuerung nach [VDMA15276]

Klassische Systeme bestehen aus einem Materialflussrechner, der die höheren Ebenen abbildet sowie mehreren Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), auf denen die unteren Ebenen realisiert werden. Die SPSen steuern und überwachen die mechanischen und elektrischen Komponenten der Anlage direkt an, während der Materialflussrechner alle Aufgaben mit dispositivem bzw. strategischem Charakter (Auftragsdisposition, Routenplanung, Koordination von Abläufen, Umsetzung von Strategien etc.) übernimmt [Büc-2000].

Diese Konzentration von Steuerungslogik auf einem zentralen Materialflussrechner führt zu einer hohen Komplexität dieser Komponente. Dies hat zur Folge, dass eine Anpassung der Steuerungslogik beispielsweise im Zuge eines Umbaus oder einer Erweiterung der Anlage mit erheblichem Aufwand und einer Vielzahl manueller Änderungen verbunden und daher kostenintensiv ist [Gün-2008a]. Das Ebenenmodell steht zudem der Forderung nach erhöhter Flexibilität und Modularisierung der Materialflusssteuerung entgegen.

### 2.2.2 SAIL – Softwarearchitektur für die Intralogistik

Eine vom Forum Intralogistik des VDMA entwickelte Systemarchitektur für die Intralogistik (SAIL) [VDI/VDMA5100] spezifiziert eine neue Form der Materialflusssteuerung. Diese basiert im Gegensatz zum Ebenenmodell nach VDMA 15276 auf einer funktionsorientierten Gestaltung intralogistischer Systeme. Die Anlagensteuerung besteht dabei aus den folgenden Standardfunktionen:

**Tabelle 2-1: SAIL-Funktionen nach [VDI/VDMA5100]**

F:FC	Anlagensteuerung ( <i>Facility Control</i> )
F:IC	Informationsgewinnung ( <i>Information Collection</i> )
F:DC	Richtungssteuerung ( <i>Direction Control</i> )
F:MM	Fahrtauftragsverwaltung ( <i>Mission Management</i> )
F:RU	Ressourcennutzung ( <i>Resource Utilisation</i> )

Das SAIL-Modell orientiert sich an Konzepten der objektorientierten Programmierung (OOP) und definiert standardisierte Funktionen und Komponenten mit einheitlichen Schnittstellen [Irr-2007]. Somit löst das SAIL-Modell die technikbedingte Hierarchie

der Materialflusssteuerung auf, ersetzt diese jedoch eine funktionale Hierarchie [Lib-2011].

### 2.2.3 Dezentrale Materialflusssteuerung im Internet der Dinge

Als ein neuer Schwerpunkt der angewandten Forschung im Bereich automatisierter Materialflusssysteme hat sich in den vergangenen Jahren die Entwicklung dezentraler Steuerungskonzepte etabliert [Hül-2007, Fur-2009, Ove-2010]. Es existieren erste industrielle Prototypen und Produkte dezentral gesteuerter Intralogistiksysteme (z.B. Dematic Multishuttle®, Lanfer THINGtelligence®). Die von diesem neuen Systemansatz erwarteten Vorteile liegen in einer verbesserten Skalierbarkeit und Anpassungsfähigkeit sowie in der angestrebten Wiederverwendbarkeit von Systemkomponenten. Wirtschaftliche Vorteile sollen durch verkürzte Inbetriebnahmezeiten und eine aufwandsarme Erweiterbarkeit der Materialflusssteuerung erzielt werden.

Unter der Bezeichnung „Internet der Dinge“ wurde in einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt von den Forschungsstellen fml und IML in Kooperation mit assoziierten Industriepartnern ein dezentraler Steuerungsansatz für Materialflusssysteme hinsichtlich seiner Praxistauglichkeit untersucht und weiterentwickelt [Hom-2006d, Gün-2010a]. Auf Basis von RFID-Technologie und Softwareagenten<sup>3</sup> übernimmt das zu transportierende Gut selbst die steuernde Rolle und nutzt die Transportdienste einer Förderanlage, um an seine Zielpunkte zu gelangen [Hom-2006e]. Auftragsrelevante Informationen befinden sich prozessnah auf einem RFID-Tag des entsprechenden Transporthilfsmittels und geben die Schritte des abzuarbeitenden Workflows vor. Diese Art der Selbststeuerung ermöglicht die automatische, dezentrale Um- bzw. Neuplanung von Transportrouten im Falle von Störungen oder Blockaden [Sch-2007].

Das Internet-der-Dinge-Konzept geht über ein reines Steuerungsmodell hinaus und sieht ergänzend eine Verteilung von Steuerungshard- und -software auf so genannte Fördertechnikmodule vor (→ funktionsorientierte Modularisierung [Wil-2006]). Diese Verteilung unterstützt eine hohe Modularität der Steuerung. Die beiden folgenden Abschnitte gehen auf Aspekte der Steuerung und der Kommunikation in einem „Internet der Dinge“ in der Intralogistik ein.

---

<sup>3</sup> Eine gute Einführung zum Thema Softwareagenten bietet [Lie-2007].

### Modularisierung und dezentrale Steuerung

Grundgedanke des dezentralen Steuerungskonzeptes nach dem Internet-der-Dinge-Prinzip ist es, dem zu transportierenden Gut die steuernde Rolle im Materialflusssystem zuzuweisen [Gün-2006c, Kuz-2010]. Um seine Ziele zu erreichen, nutzt es die Transportdienste der Module sowie unterstützend zusätzliche Softwaredienste. Die drei Grundeinheiten (Entitäten) eines Materialflusssystems nach dem Internet-der-Dinge-Prinzip sind somit

- **Transporteinheiten**,
- **Module**, die (Transport-)Funktionen anbieten, und
- **Softwaredienste**, welche die Koordination zwischen den Transporteinheiten und den Modulen unterstützen (z.B. Verzeichnisdienste) oder für Systemtransparenz sorgen (z.B. Visualisierung).

Abbildung 2-13 verdeutlicht die drei konkreten Ausprägungen einer Entität als Transporteinheit, Modul oder Softwaredienst.

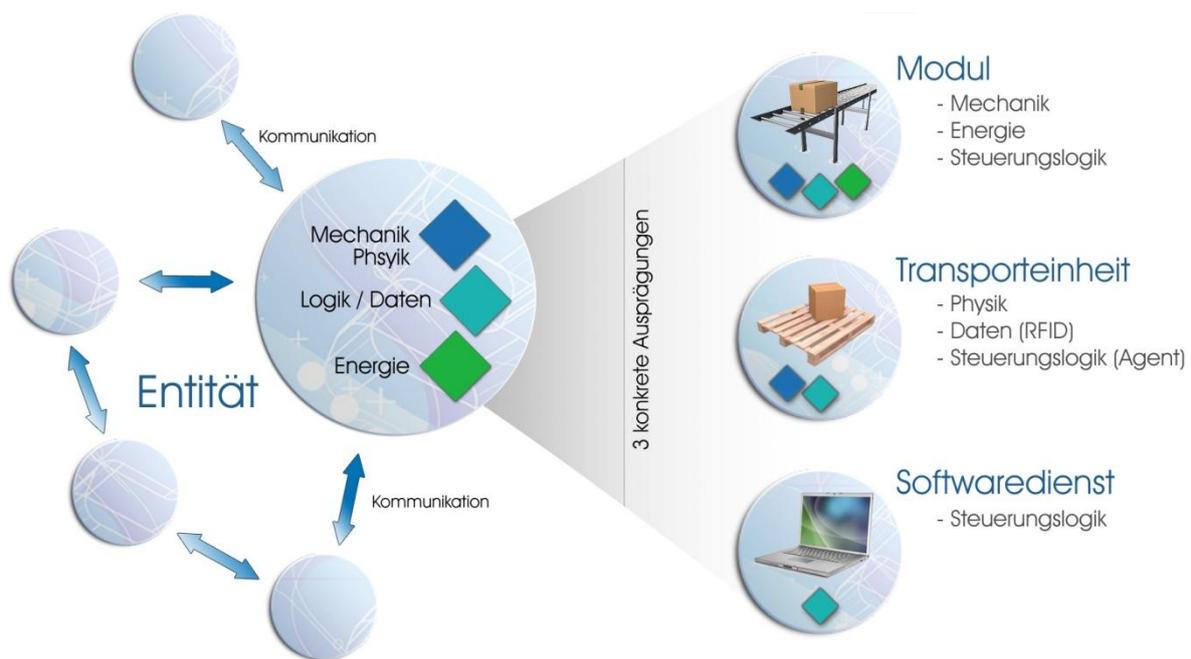
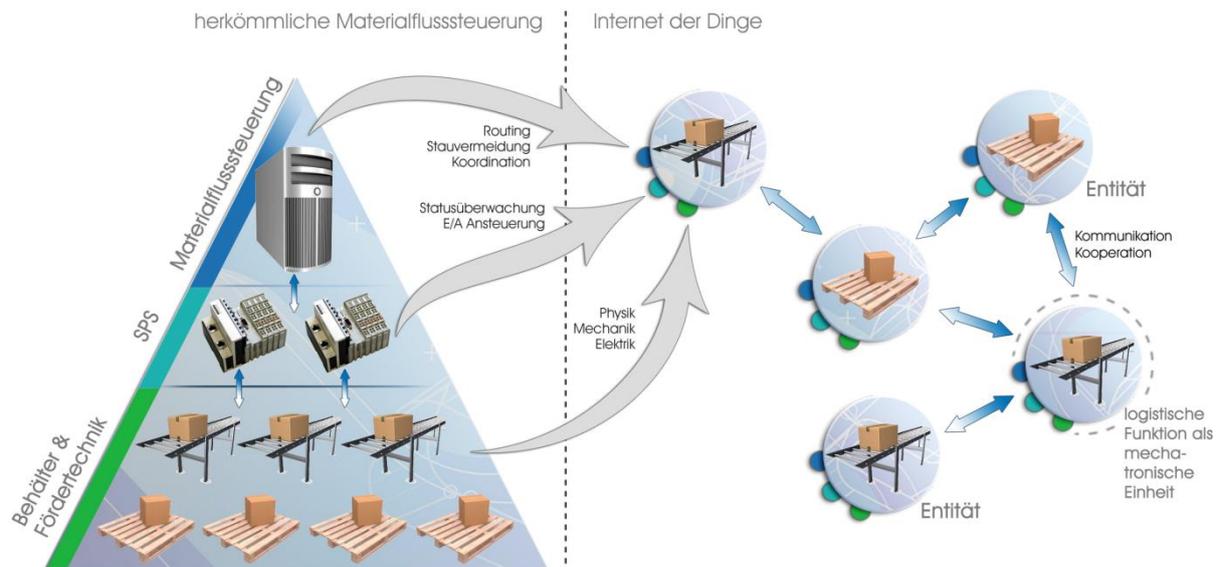


Abbildung 2-13: Entitäten eines Internet der Dinge in der Intralogistik [Gün-2010a, S. 55]

### Kommunikation im Internet der Dinge

Für die Kommunikation zwischen diesen Grundeinheiten wurde auf Multiagentensysteme zurückgegriffen, wie sie in verteilten IT-Systemen Einsatz finden [Lie-2007]. Jedem Modul, jeder Transporteinheit und jedem Dienst ist ein Softwareagent zuge-

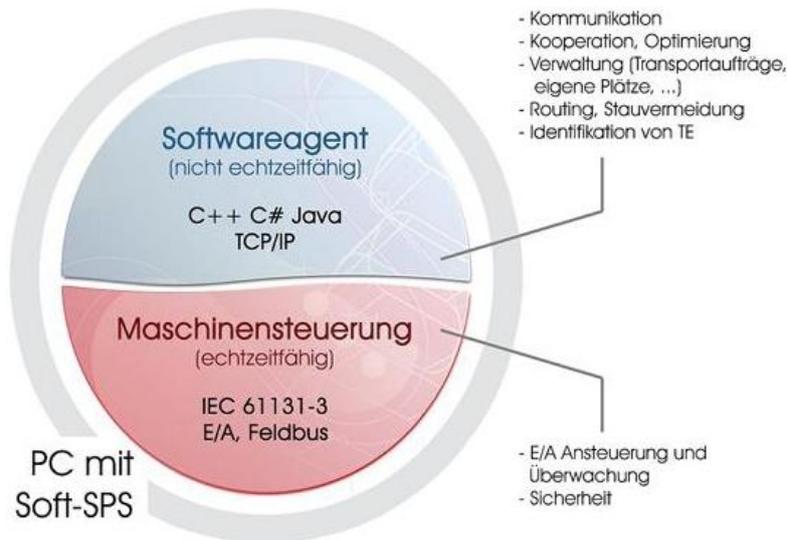
ordnet, der einen gezielten Datenaustausch unterstützt. Abbildung 2-14 zeigt, wie sich das Steuerungsprinzip im Internet der Dinge von der herkömmlichen, hierarchischen Materialflusssteuerung unterscheidet. Funktionen, die bisher auf verschiedenen Hierarchiestufen der Steuerungspyramide angesiedelt waren, werden auf Module und Transporteinheiten verteilt. Es gibt somit keine höheren Steuerungsinstanzen wie z.B. einen Materialflussrechner.



**Abbildung 2-14: Eine Übertragung des Internet-der-Dinge-Konzepts auf die Intralogistik ermöglicht hierarchielose Materialflusssysteme auf Basis kooperierender Entitäten [Gün-2010a, S. 45]**

Die Kommunikation der Softwareagenten wird über WLAN, TCP/IP und XML abgewickelt, die Speicherung von Daten erfolgt auf einer MS-SQL Datenbank. Ein umfangreicher Datenaustausch ist v.a. für höhere Funktionen der Fördertechnikmodule, wie z.B. Auftragsverwaltung oder Wegplanung, notwendig. Für eine dezentrale Steuerung von Systemen mit hohen Fördergeschwindigkeiten sind die derzeit eingesetzten Datenformate und Kommunikationsprotokolle jedoch ungenügend. Daher wird in Abschnitt 6.2 nach eine alternative Kommunikationsinfrastruktur entworfen.

Abbildung 2-15 zeigt die im Internet-der-Ding-Projekt genutzte Zwei-Schichten-Architektur, welche den echtzeitkritischen Datenaustausch mittels eines Feldbussystems realisiert. Maschinensteuerung und Softwareagent laufen dem Prinzip der Modularisierung folgend auf einem Embedded PC mit Soft-SPS direkt am Modul.



**Abbildung 2-15: Zwei-Schichten-Architektur für Module [Chi-2010, S. 28]**

Eine Übertragung des Internet-der-Dinge-Konzepts auf die Intralogistik ermöglicht somit hierarchielose Materialflusssysteme auf Basis autonomer, kooperierender Entitäten und stellt somit auch für die Steuerung einer Zellularen Fördertechnik die Idealziel dar. Auch im Rahmen des diesem Bericht zugrunde liegenden Projekt wird eine möglichst hohe Dezentralität der Materialflussteuerung angestrebt, was sich u.a. auf die Gestaltung des Kommunikationssystems auswirkt (vgl. Abschnitt 6.2).

## 2.3 Kommunikationstechnik

Einen weiteren wichtigen Aspekt bei der Gestaltung Zellularer Transportsysteme stellt ein geeignetes Konzept für den Datenaustausch zwischen Fahrzeugen, Peripherieeinrichtungen und übergeordneten Ebenen dar. Daher sollen im folgenden Abschnitt bestehende Konzepte aus den verwandten Domänen „Fahrerlose Transportsysteme (FTS)“ sowie „Car-to-X-Kommunikation (C2X)“ auf übertragbare Problemstellungen und Lösungen hin untersucht werden. Verwendete Technologien und Protokolle können als Grundlage für die zu entwickelnden Kommunikationssysteme für ein Zellulare Fördertechnik dienen. Zu Beginn dieses Abschnitts wird mit dem ISO/OSI Referenzmodell eine wichtige theoretische Grundlage für die Modellierung von Kommunikationssystemen vorgestellt. Dieses Schichten-Modell ermöglicht eine logische Aufteilung komplexer Gesamtzusammenhänge beim Aufbau lokaler Netzwerke bzw. beim Datenaustausch zwischen zwei Systemen.

### ISO/OSI Referenzmodell und TCP/IP Referenzmodell

Beim Modell der „Open System Interconnection“ (OSI) handelt es sich um ein ursprünglich von der International Standardization Organisation (ISO) entwickeltes Referenzmodell für herstellerunabhängige Kommunikationssysteme. Die sieben hierarchischen Schichten (engl.: layer) des Referenzmodells sind in Abbildung 2-16 dargestellt. Die Schichten 1 bis 4 sind dabei transportorientiert, während die Schichten 5 bis 7 anwendungsorientiert sind. Für jede der Schichten existiert eine Anforderungsbeschreibung, welche Aufgabe der entsprechenden Schicht zukommt. So gewährleistet die Anwendungsschicht (Schicht 7, application layer) Anwendungen den Zugriff auf das Netzwerk, während die Bitübertragungsschicht (Schicht 1, physical layer) die elektrische, mechanische und funktionale Schnittstelle zum Übertragungsmedium definiert. Die Funktionen der Schichten 1 bis 4 werden im Abschnitt 2.3.2 näher beschrieben. Als Defizit dieses Modells ist die unzureichende Definition der Kommunikationssitzung in den oberen Schichten zu nennen. Innerhalb der siebten Schicht erfolgt lediglich eine anwendungsspezifische Interpretation der Daten in Abhängigkeit ihrer Syntax.

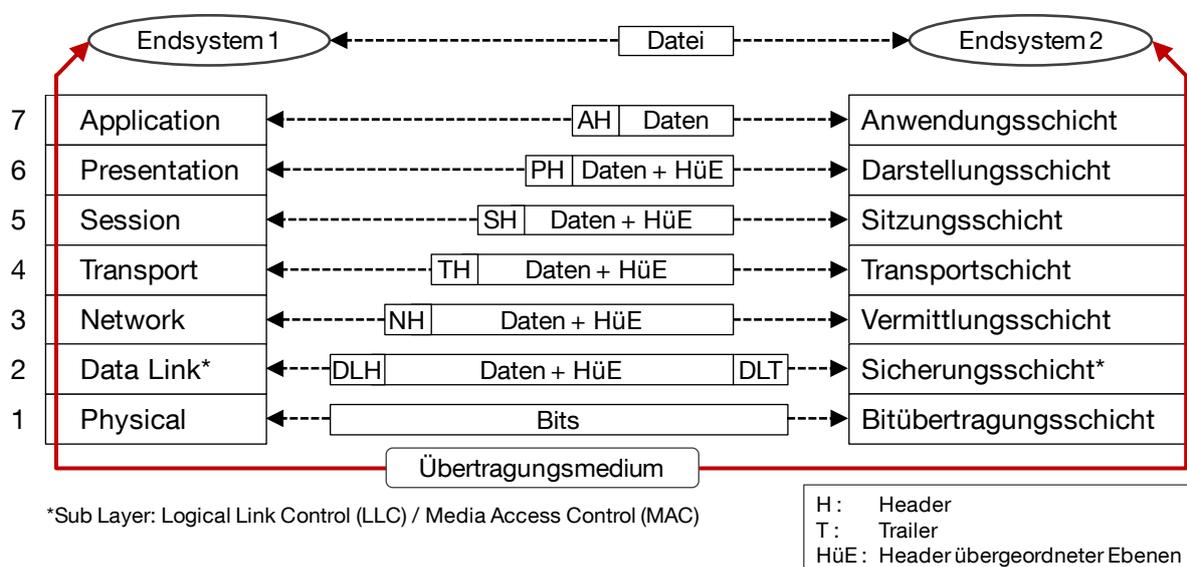


Abbildung 2-16: Das ISO/OSI Referenzmodell

Während der Datenübermittlung erhalten die eigentlichen Daten in jeder Schicht vorgeschaltete Steuerinformationen (z.B. Adressen, Routinginformationen, Übertragungsparameter etc.), einen so genannten Header. Auf der Empfängerseite dienen diese Header zum stufenweisen Entpacken der eigentlichen Anwendungsdaten. Ein Trailer ist eine Bitfolge, die bei der Datenübertragung dem eigentlichen Datenpaket

angehängt wird. Der Trailer enthält Informationen zum Erkennen und Korrigieren von Übertragungsfehlern und wird dem Datenpaket daher auf der Sicherungsschicht angefügt.

Für jede der Schichten existieren Kommunikationsprotokolle, die Vereinbarungen für den Datenaustausch mit den benachbarten Schichten festlegen. Die konkrete Umsetzung wird nicht vorgegeben und kann je nach Anwendungsfall bzw. Anforderungsprofil sehr unterschiedlich sein. Dies spiegelt sich in einer Vielzahl verschiedener Protokolle pro Schicht wider (z.B. TCP/UDP, HTTP/FTP).

Eine bestimmte Kombination von Protokollen über die Schichten hinweg wird als Protokollstapel (engl.: protocol stack) bezeichnet. Tabelle 2-2 zeigt beispielhaft einen Protokollstapel der Internet-Protokollfamilie. Für diese Protokollfamilie existiert ein eigenes, vier Schichten umfassendes Referenzmodell, das so genannte TCP/IP Referenzmodell, benannt nach den beiden meistgebrauchten Protokollen der Internet-Protokollfamilie. TCP/IP steht für Transmission Control Protocol/Internet Protocol.

**Tabelle 2-2: Beispielhafter Protokollstapel**

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

Die beiden vorgestellten Referenzmodelle können somit als Designgrundlage für Kommunikationsprotokolle in Rechnernetzen und somit auch auf die Kommunikation innerhalb eines autonomen Fahrzeugschwarms angewendet werden.

### 2.3.1 Kommunikation in Fahrerlosen Transportsystemen (FTS)

In Fahrerlosen Transportsystemen (vgl. Abschnitt 2.1.2) erfolgt das informationstechnische Zusammenwirken von stationärer Leitsteuerung, sonstigen ortsfesten Einrichtungen und Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) durch angepasste Datenübertragungssysteme [VDI2510]. Dabei stellt die Mobilität der Transportfahrzeuge das Kommunikationssystem vor ähnliche Herausforderungen wie sie in Zellularen Transportsystemen anzutreffen sind. So wird in Fahrerlosen Transportsystemen für

den Datenaustausch zwischen den stationären Sende-/Empfangseinrichtungen und den Sende-/Empfangseinrichtungen der Fahrzeuge häufig eine berührungslose Kommunikationstechnik eingesetzt. Gängige berührungslose Übertragungstechniken sind:

- Kommunikationsschleife im Boden für induktiven Datenaustausch
- Schmalbandfunk (z.B. 433 MHz)
- Breitbandfunk (WLAN nach IEEE 802.11)
- Infrarot

Nach VDI-Richtlinie 2510 [VDI2510] lassen sich diese Techniken abhängig von ihrem Wirkungsbereich als punktbezogen, streckenbezogen oder flächendeckend klassifizieren. Während induktive Techniken nur eine punkt- oder streckenbezogene Übertragung erlauben, können per Infrarot aller drei Ausprägungen erreicht werden (als Punkt-zu-Punkt-Verbindung, als Richtstrecke oder mit Weitwinkelcharakteristik). Die betrachteten Funklösungen wirken grundsätzlich flächendeckend.

Ein Datenaustausch mittels Induktion kommt aufgrund seines punkt- oder streckenbezogenen Charakters nur sehr bedingt für die Datenübertragung in einem Zellularen Transportsystem in Frage und kann höchstens auf Hauptstrecken oder während schienengebundener Fahrtanteile ergänzend zu einer flächenbezogenen Kommunikationstechnik eingesetzt werden. Somit werden in Abschnitt 6.2.1 „Kommunikationstechnologien“ nur Infrarot und Funk als mögliche berührungslose Übertragungstechniken für Zellulare Transportsysteme näher untersucht.

Wie auch bei einer Zellularen Fördertechnik hängt der nötige Kommunikationsbedarf zwischen der stationären Steuerung und den mobilen Fahrzeugen stark von der Funktionsverteilung auf die Leitsteuerung bzw. die Fahrzeugsteuerung sowie von den Aufgaben der Fahrzeuge ab. Folgende Kommunikationsbeziehungen sind in einem Fahrerlosen Transportsystem vorhanden [Ull-2011]:

1. Stationäre Leitsteuerung und FTF
2. Stationäre Leitsteuerung und ortsfeste Stationen (Lastübergabestationen, automatische Batterieladestation, andere periphere Einrichtungen)
3. Ortschaften (z.B. Lastübergabestationen) und FTF
4. FTF und FTF

In einer Zellularen Fördertechnik existieren ähnliche Kommunikationspartner. Allerdings kommt der stationären Leitsteuerung eine untergeordnete Rolle zu. Im Idealfall wird diese gänzlich aufgelöst und ihre Funktionen auf die Fahrzeugsteuerung übertragen (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Als Informationseinheiten des Datenaustausches unterscheidet die VDI-Richtlinie 2510 [VDI2510] in Fahrerlosen Transportsystemen binären Signalen und Datentelegrammen. Binäre Signale können durch einfache Elemente wie Endschalter, Reed-Kontakte und Lichtschranken oder mittels komplexerer Systeme durch die Bündelung der einzelnen Binärinformationen in vorgegebener Reihenfolge übertragen werden. Datentelegramme enthalten komplexere Informationen (z.B. Fahrauftrag), deren Kodierung mehrere Bytes umfassen kann (vgl. [VDMA15276]). Datentelegramme werden meist über die oben genannten berührungslosen Übertragungstechniken übermittelt.

### 2.3.2 Car-to-X-Kommunikation (C2X)

Unter dem Begriff Car-to-X-Kommunikation (C2X) werden der Datenaustausch

- zwischen Kraftfahrzeugen (Car-to-Car (C2C), im englischen Sprachraum Vehicle-to-Vehicle (V2V)) sowie
- zwischen Kraftfahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur (Car-to-Infrastructure (C2I), im englischen Sprachraum Vehicle-to-Roadside (V2R))

subsummiert [C2C-2007]. Netzwerke der Car-to-X-Kommunikation werden als Vehicular Ad-hoc Networks (VANET) bezeichnet. Allgemein lassen sich in VANETs zwei Arten von Netzwerkknoten unterscheiden: On-Board-Units (OBU) sind Funkknoten am Fahrzeug selbst, während Road-Side-Units (RSU) Funkeinrichtungen an stationärer Verkehrsinfrastruktur entsprechen. Die Car-to-X-Kommunikation nutzt die Funktechnik von WLANs (Wireless Local Area Network) nach IEEE 802.11p [Jia-2008]. Befindet sich ein Fahrzeug im Funkraum einer weiteren On-Board- oder Road-Side-Unit, so kann es mit diesen automatisch ein WLAN aufbauen. Gleichzeitig kann ein Fahrzeug Nachrichten von anderen Kommunikationspartnern (OBU, RSU) an weiter entfernte Fahrzeuge weiterleiten.

IEEE 802.11p unterstützt so genannte Dedicated Short Range Communications (DSRC) im Frequenzband von 5,85 bis 5,925 GHz. Es handelt sich dabei um die US-

amerikanische Version von DSRC, welche explizit für die Kommunikation in so genannten Intelligent Transportation Systems (ITS) vorgesehen ist. Daneben existieren eine europäische und eine japanische DSRC-Version, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Es sei allerdings angemerkt, dass sich in Europa die Bezeichnung ITS-G5 für die US-amerikanische DSRC-Version etabliert hat, um Verwechslungen mit dem europäischen CEN-Standard vorzubeugen.

Zusammengefasst wird die ITS-Kommunikation unter der Bezeichnung WAVE (Wireless Access for Vehicular Environment). Der WAVE Protokollstapel beinhaltet neben dem IEEE-802.11p-Standard die ebenfalls von der IEEE entwickelten Standards 1609.1, 1609.2, 1609.3 und 1609.4 für die höheren Schichten (vgl. Abbildung 2-17).

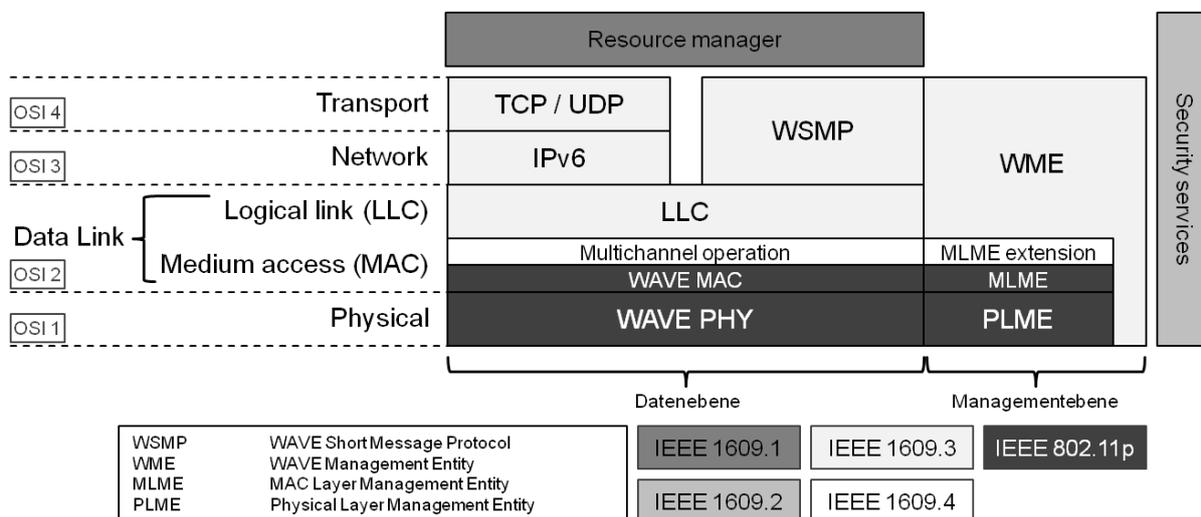


Abbildung 2-17: WAVE Protokollstapel (in Anlehnung an [Uzc-2009])

Den einzelnen Standards kommen dabei folgende Funktionen zu:

- **IEEE 1609.1** (Resource manager) – Unterstützt die Kommunikation zwischen Remote-Anwendungen und Fahrzeugen
- **IEEE 1609.2** (Security services) – Sicherheitsdienste für den Austausch von Anwendungs- und Managementdaten
- **IEEE 1609.3** (Networking services) – Standard für den WAVE Network Layer
- **IEEE 1609.4** (Multichannel operation) – Ermöglicht Mehrkanalbetrieb
- **IEEE 802.11p** – Anpassung/Erweiterung der IEEE 802.11-Norm unter Berücksichtigung verkehrsspezifischer Anforderungen

Datenpakete werden bei WAVE mit einem Zeitstempel und der Position des Senders versehen. Die Position wird dabei mit Hilfe eines GPS-Empfänger ermittelt. Empfänger des übermittelten Datenpaketes überprüfen anhand dieser Informationen die Gültigkeit Datenpaketes.

In Europa wird vom Car 2 Car Communication Consortium (C2C-CC, Zusammenschluss europäischer Automobilhersteller, Zulieferer und Forschungseinrichtungen) aufbauend auf IEEE 802.11p bzw. WAVE ein offener Industrie-Standard für die Car-to-X-Kommunikation angestrebt. Netzwerke der Car-to-X-Kommunikation sollen u.a. einen effizienten, stockungsfreien Verkehrsfluss fördern und Autofahrer frühzeitig vor gefährlichen Straßen- und Verkehrsverhältnissen warnen, um Unfälle zu vermeiden. Das „CAR 2 CAR Communication Consortium Manifesto“ [C2C-2007] sieht folgende Kommunikationskanäle verpflichtend vor:

1. Netzwerkkontrolle / sicherheitskritische Anwendungen (Control Channel CCH)
2. sicherheitskritische Anwendungen
3. Verkehrssicherheit und -effizienz
4. nicht sicherheitskritische Car-to-X-Kommunikation

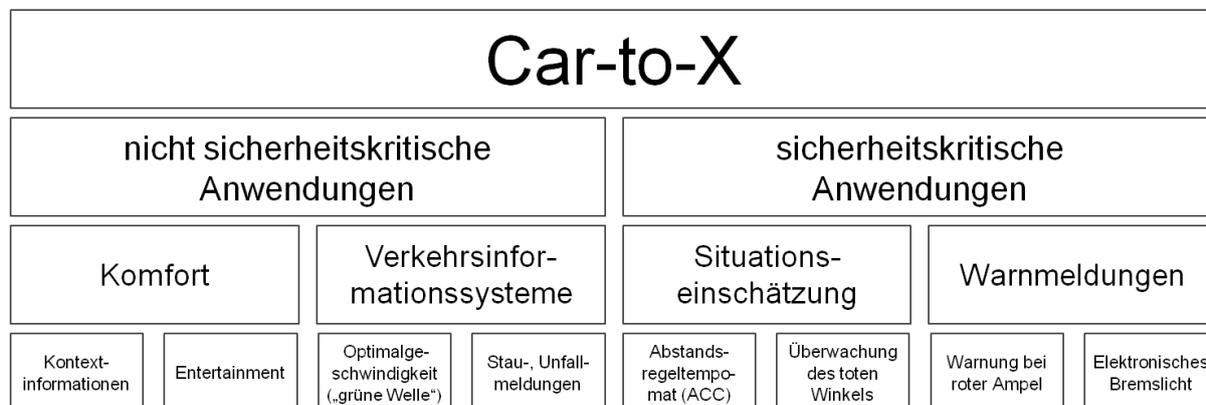
Für die C2C-CC-Kanäle wurden beim European Telecommunications Standards Institute (ETSI) für den europäischen Raum folgende Frequenzbereiche angefragt:

1. 10 MHz zwischen 5,885 und 5,895 GHz (entspricht WAVE Control Channel)
2. 10 MHz zwischen 5,895 und 5,905 GHz
3. 3x 10 MHz zwischen 5,875 und 5,885 GHz / zwischen 5,905 und 5,925 GHz
4. 2x 10 MHz zwischen 5,855 und 5,875 GHz

Die Europäische Union hat aktuell (Stand: Januar 2012) für C2C-Anwendungen jedoch nur den Frequenzbereich zwischen 5,875 GHz und 5,905 GHz freigegeben [BUN-2009].

Mögliche Absolutgeschwindigkeiten der Fahrzeuge von 250 km/h oder sogar Relativgeschwindigkeiten der Kommunikationspartner von bis zu 500 km/h (~ 140 m/s) stellen eine große Herausforderung für eine Car-to-X-Kommunikationssystem dar. Hier herrschen bei innerbetrieblichen Transporten, wie sie für eine Zellulare Förder-technik maßgeblich sind, wesentlich geringere Geschwindigkeiten und somit auch geringere Anforderungen vor.

Zusätzlich zu den verpflichtenden C2C-CC-Kanälen ist optional die Nutzung öffentlicher Kanäle nach IEEE 802.11a/b/g für Infotainment-Inhalte vorgesehen. Abbildung 2-18 gibt einen Überblick über mögliche Anwendungen der Car-to-X-Kommunikation und gliedert diese nach ihrer Sicherheitsrelevanz.



**Abbildung 2-18: Klassifikationsschema für Car-to-X-Anwendungen (nach [Som-2011, S. 43])**

Als weitere mögliche Übertragungstechniken nennt das C2C-CC-Manifest [C2C-2007]:

- Global System for Mobile Communications (GSM/2G<sup>4</sup>)
- Universal Mobile Telecommunications System (UMTS/3G)
- High Speed Downlink Packet Access (HSDPA/3,5G)
- Long Term Evolution (LTE/4G)
- Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX / IEEE 802.16)
- Digital Video Broadcasting (DVB)

Eine ausführliche Übersicht über die Eigenschaften dieser und weiterer relevanter Kommunikationstechniken findet sich in Abschnitt 6.2.1.

Bei der Strukturierung des Kommunikationssystems bedient sich das C2C-CC dem weiter oben beschriebenen ISO/OSI Referenzmodell und spezifiziert die Schichten 1 bis 4 (Physical, Data Link (MAC/LLC), Transport und Network Layer). Es ist allerdings anzumerken, dass das C2C-CC-Manifest Entwurfscharakter aufweist und weiteren Handlungsbedarf offen lässt [C2C-2007]. Dennoch sollen im Folgenden Eigenschaften, Protokolle und Mechanismen der einzelnen Schichten kurz beschrieben werden. Der Fokus liegt dabei auf der Suche nach Lösungen und Ansätzen, die auf

---

<sup>4</sup> Mobilfunkstandard der zweiten Generation

die Kommunikation in einem Zellularen Transportsystem übertragbar sind. Eine detaillierte Übersicht über das Design des für die Car-to-X-Kommunikation angestrebten Funk- und Kommunikationssystems findet sich in [C2C-2007] (Kapitel 6 und 7).

### Schicht 1: Physical Layer

Der Physical Layer definiert allgemein die

- elektrische (z.B. Spannungspegel, Kodierungsverfahren),
- mechanische (z.B. Stecker, Antennen, Übertragungsmedium)
- funktionale (z.B. Taktgebung, Pin-Belegung) und
- verfahrenstechnische (z.B. Übertragungsmodus)

Schnittstelle zum Übertragungsmedium, in diesem Fall also zu den oben genannten C2C-CC-Kanälen. Tabelle 2-3 fasst die Eigenschaften des C2C-CC Physical Layers zusammen. IEEE 802.11p\* bezeichnet dabei die europäische Variante des Standards IEEE 802.11p.

Tabelle 2-3: C2C-CC Physical Layer

Physical Layer	
<b>Standard</b>	IEEE 802.11p*
<b>Frequenzbereich</b>	5,855 – 5,925 GHz (ursprünglich beantragt, s.o.)
<b>Max. Sendeleistung</b>	33 dBm
<b>Reichweite</b>	500-1000 m (Single-Hop, Sichtlinie)
<b>Übertragungsmodi</b>	Halbduplex <sup>5</sup> / Broadcast <sup>6</sup>
<b>Datenraten</b>	3 – 4,5 – 6* – 9 – 12 – 18 – 24 – 27 Mbit/s (*Standard)
<b>Frequenzmodulation</b>	OFDM
<b>Antennenbauform</b>	bisher nicht definiert

### Schicht 2: MAC/LLC Layer / Data Link Layer

Der Data Link Layer (Sicherheitsschicht) bereitet Daten des Network Layers in so genannte Frames (Datenrahmen definierter Größe) auf und reicht diese an den Phy-

<sup>5</sup> Wechselbetrieb: Informationsfluss auf einem Kanal *abwechselnd* in beide Richtungen möglich

<sup>6</sup> Datenübertragung von einem Punkt aus an alle Netzwerkteilnehmer

sical Layer weiter. Das Zerlegen von Frames in einzelne Bits für Schicht 1 und umgekehrt das Zusammensetzen einzelner Bits zu Frames gehört ebenfalls zu den Aufgaben des Data Link Layers. Der Data Link Layer wird häufig in die zwei Teilschichten Media Access Control (MAC) und Logical Link Control (LLC) untergliedert.

Die MAC-Teilschicht kommuniziert direkt mit dem Physical Layer. Sie steuert den Sendevorgang und ist für die Adressierung der Datenpakete zuständig (MAC-Adresse der Netzwerkkarte des Empfängers und des Senders).

Die LLC-Teilschicht übernimmt die Flusskontrolle, d.h. die Sequenzierung und Bestätigung einzelner Frames. So wird sichergestellt, dass eine Station nur so viele Daten versendet, wie der Empfänger auch verarbeiten kann. Der LLC Sub Layer bietet einen einheitlichen Zugangspunkt zum C2C-CC Network Layer und kann der Unterscheidung zwischen IP-basierter bzw. Peer-to-Peer-Kommunikation und spezifischen C2C-CC-Nachrichten dienen. Tabelle 2-4 gibt eine Übersicht über Standards und Funktionen in den Teilschichten MAC und LLC nach dem C2C-CC.

**Tabelle 2-4: C2C-CC MAC/LCC Layer**

<b>MAC/LLC Sub Layer</b>	
<b>Standard</b>	IEEE 802.11p*
<b>Zugriffsverfahren</b>	CSMA/CA
<b>Mehrkanalbetrieb</b>	Synchronisation per Coordinate Universal Time (UTC)
<b>Doppeltes Empfangsteil</b>	gleichzeitiger Empfang zweier C2C-CC-Kanäle
<b>Adressierung</b>	48 bit und 64 bit MAC-Adressen
<b>Nachrichtengröße</b>	keine Aussage
<b>Priorisierung</b>	nach IEEE 802.11e
<b>Wartezeiten</b>	keine Aussage

Das Zugriffsverfahren CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) baut auf CSMA/CD (CD – Collision Detection) auf und dient der Vermeidung von Signalkollisionen während der Datenübertragung. Eine sendewillige Station sendet zunächst eine Warnung über das Netz, woraufhin alle anderen Stationen warten. Dieses Verfahren garantiert einerseits, dass die Leitung frei ist, sorgt auf der anderen Seite aber auch für eine zusätzliche Netzbelastung, was den Zugriff verlangsamt.

Der Mehrkanalbetrieb soll gewährleisten, dass sicherheitskritische Nachrichten von allen Geräten während eines Control Channel Intervalls auf jeden Fall empfangen werden. Die doppelte Ausführung des Empfangsteils (Dualreceiver) ermöglicht darüber hinaus den gleichzeitigen Empfang von Nachrichten zweier ausgewählter C2C-CC-Kanäle und erlaubt es somit, durchgehend auf dem Control Channel mitzuhören und trotzdem gleichzeitig (sicherheitskritische) Nachrichten mit anderen Teilnehmern auszutauschen.

Die einzelnen Netzwerkknoten sollen sowohl MAC-Adressen mit 48 bit Länge (EUI7-48) als auch mit 64 bit Länge (EUI-64) unterstützen, um die Kompatibilität mit kommerziellen WLAN-Zugriffstechnologien zu gewährleisten. Um einen verbesserten Datenschutz zu unterstützen, erfolgen in regelmäßigen Zeitabständen Adresswechsel. Auch eine Nutzung mehrerer MAC-Adressen gleichzeitig soll unterstützt werden.

Eine Priorisierung nach IEEE 802.11e garantiert Datenpaketen eine gewisse Bandbreite im Netzwerk. Auf diese Weise erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass wichtige Datenpakete innerhalb einer bestimmten Zeitspanne beim Empfänger ankommen.

### **Schicht 3: Network Layer**

Der Network Layer (Vermittlungs-/Netzwerkschicht) legt den Verbindungsweg im Netz fest. Er realisiert eine Ende-zu-Ende-Verbindung zwischen zwei kommunizierenden Stationen über verschiedene Netzwerkknoten hinweg. Hierzu gehören die Adressinterpretation, die Festlegung des Übertragungswegs (Routing) sowie die Kopplung verschiedener Transportnetze. Wenn Router die ankommenden Pakete nicht in der gewünschten Größe übertragen können, erfolgt eine weitere Fragmentierung der Datenpakete.

Der C2C-CC Network Layer berücksichtigt Anforderungen verschiedener Car-to-X-Anwendungen (vgl. Abbildung 2-18). So richten sich sicherheitskritische Anwendungen an Fahrzeuge in einem beschränkten geografischen Umfeld und werden per Broadcast versendet, was einem Fluten des Zielgebiets entspricht. Hierbei bestehen strenge Anforderungen bzgl. Zuverlässigkeit und Verzögerung. Unkritische Anwendungen wie der Internetzugang verwenden Unicast (Punkt-zu-Punkt-Verbindung) und

---

<sup>7</sup> Extended Unique Identifier

weisen weniger strenge Anforderungen auf. Hauptaspekte bei der Gestaltung der Protokolle für die Vermittlungsschicht sind:

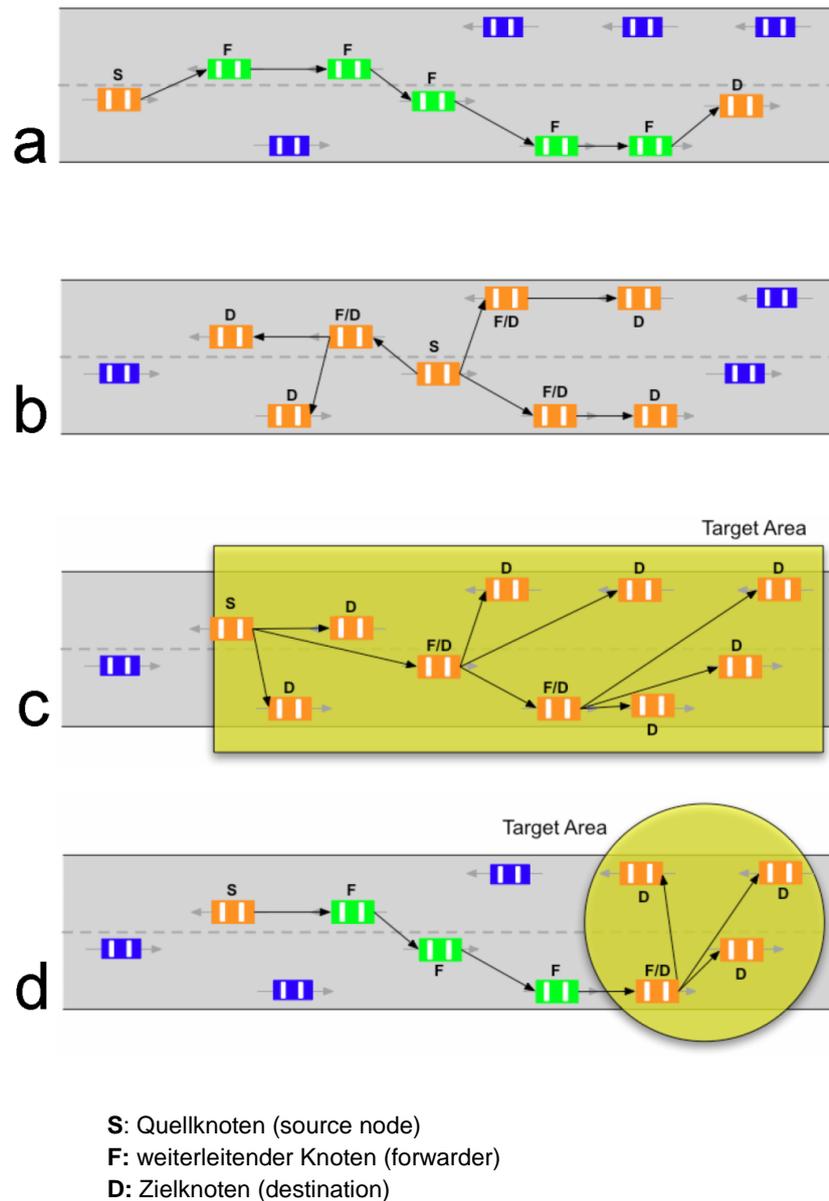
1. Die Organisation und Koordination des Netzwerks muss ohne Zentralinstanz realisiert werden, d.h. die verwendeten Algorithmen und Protokolle müssen vollständig dezentral lauffähig sein.
2. Die hohe Mobilität der Teilnehmer und die damit verbundene ständige Veränderung der Netzwerktopologie zieht einen Mehraufwand bei der Datenübertragung nach sich.
3. Der Datenverkehr, der durch die Fahrzeuge erzeugt wird, kann die verfügbare Bandbreite übersteigen, was Paketverluste und Zeitverzögerungen bei der Übertragung zur Folge hätte.

Diesen Herausforderungen muss mit angepassten Mechanismen auf der Netzwerkebene gezielt begegnet werden. So muss bei einer zu erwartenden dichten Netzwerksituation (z.B. in Städten oder auf Hauptverkehrswegen) die Datenmenge kontrolliert werden, um die Bandbreite nicht zu überlasten. Eingesetzte Strategien zur Datenweiterleitung (Forwarding) müssen sehr effizient sein, um wichtige Nachrichten zuverlässig zu übermitteln. Bei einer lichten Netzwerksituation (z.B. auf Nebenstraßen) stellt die Gefahr einer Kanalüberlastung dagegen kein Problem dar. Da sich jedoch oftmals kein anderes Fahrzeug in Reichweite befindet, sollten Nachrichten in dieser Situation zwischengespeichert und wiederholt werden, um sicherzustellen, dass ein Fahrzeug im Gefahrenbereich auch informiert wird, wenn es zum Zeitpunkt der Gefahrenerkennung nicht erreichbar war.

In Abbildung 2-19 sind mögliche Weiterleitungsalgorithmen dargestellt [C2C-2007]. Topologiebasiertes Routing orientiert sich am logischen Aufbau des Netzwerkes. So kann eine Nachricht beispielsweise jeweils an die nächsten beiden im Netzwerk benachbarten Knoten übermittelt werden (2 Hops<sup>8</sup>). Die Geografische Adressierung setzt eine regelmäßige Verfügbarkeit von Positionsinformationen für alle Netzwerkknoten (z.B. durch GPS) voraus und erlaubt es, Nachrichten räumlich gezielt zuzustellen.

---

<sup>8</sup> Bei der Multi-hop-Kommunikation werden Datenpakete über mehrere Zwischenstationen (Netzwerkknoten) an den Empfänger weitergeleitet (n Zwischenstationen = n+1 Hops)



**Abbildung 2-19: Geografischer Unicast (a), Topologiebasierter Broadcast (z.B. 2 Hops)(b), Geografie-basierter Broadcast / Anycast (c), Geografie-basierter Broadcast mit Datentransport ins Zielgebiet (d) [C2C-2007]**

Eine Verwendung von Weiterleitungsalgorithmen könnten ggfs. auch für ein Netzwerk aus Transportfahrzeugen in einem Zellularen Transportsystem sinnvoll sein.

#### Schicht 4: Transport Layer

Der Transport Layer (Transportschicht) realisiert eine stabile Verbindung zwischen zwei Prozessen und liefert den darüber liegenden anwendungsorientierten Schichten 5 bis 7 einen transparenten Datenkanal. In Abhängigkeit der verwendeten Protokolle werden die Daten aufbereitet, d.h. in Pakete gültiger Größe unterteilt und durchnummeriert. In dieser Schicht erfolgt eine weitere Flusskontrolle und Fehlerkontrolle.

So wird überprüft, ob die Datenpakete vollständig, korrekt, in der richtigen Sequenz und ohne Duplikate ankommen. Der im C2C-CC-Manifest [C2C-2007] vorgestellte Transport Layer befindet sich noch in der Entwurfsphase und verfügt daher noch nicht über angepassten Transportprotokolle. Es werden lediglich Anforderungen an diese Schicht in einem Car-to-X-Netzwerk formuliert und mögliche Standards wie TCP und UDP<sup>9</sup> bezüglich deren Eignung untersucht. Einige dieser Anforderungen an die Gestaltung des Transport-Layer-Protokolls seien an dieser Stelle genannt:

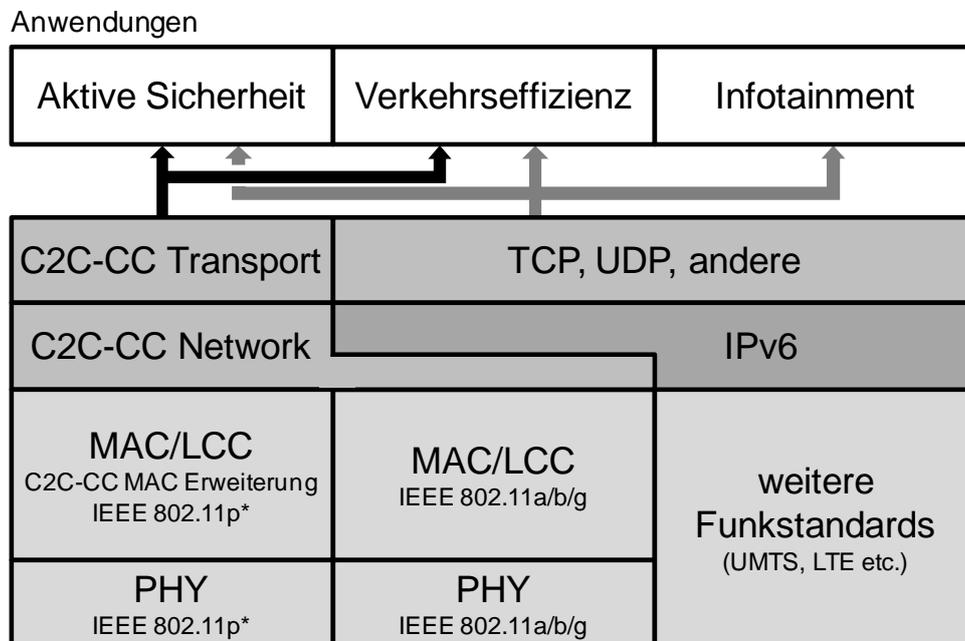
- Fehlerfreier Transport: Entweder die Anwendungen selbst oder das Transportprotokoll müssen fehlerhafte Datenpakete erkennen und korrigieren.
- Zuverlässigkeit: Gesendete Warnung muss alle relevanten Empfänger erreichen.
- Multiplexing: Die Transportprotokolle sollen multiplexingfähig sein, d.h. mehrerer Signale bündeln und simultan über ein Medium übertragen können.
- Verzögerungsbeschränkung und Gültigkeit des Standorts: Da die Bedeutung von Nachrichten abhängig von Zeit und Ort ist, können diese auch veraltet oder irrelevant sein. Dies führt zu zusätzlichen Beschränkungen für die Zwischenspeicherung, die Übermittlung, das wiederholte Übertragen von Daten und Ende-zu-Ende-Verbindungen.
- Priorisierung von Datenpaketen: Datenpakete sollen abhängig von ihrer jeweiligen Prioritäten im Bezug auf Zwischenspeicherung, Verwerfen oder Weiterleitung unterschiedlich gehandhabt werden.
- Datenaggregation: Die Daten von Anwendungen mit geringem Datenvolumen sollen in einem Paket zusammengefasst werden, um so die Kommunikationslast zu verringern.
- Anwendungsdatenmenge: Im Gegensatz zur Datenaggregation können die Daten einer Anwendung auch zu groß für ein einzelnes Paket auf dem Netzwerk Layer sein und müssen daher auf mehrere Pakete aufgeteilt und aus diesen am Ziel wieder zusammengesetzt werden. Dies ist eine typische Aufgaben des Transport Layers.

---

<sup>9</sup> User Datagram Protocol

### C2C-CC Protokollstapel und zukünftige Arbeitsfelder

Abbildung 2-20 gibt einen Überblick über die in diesem Abschnitt vorgestellten Schichten des C2C-CC Protokollstapels. Es wird deutlich, dass Network und Transport Layer noch nicht genau spezifiziert sind.



**Abbildung 2-20: C2C-CC Protokollstapel (in Anlehnung an [C2C-2007, S. 33])**

So fehlt ein Mechanismus, der bei einer sehr großen Zahl von C2C-Teilnehmern (z.B. im Verkehrsstau) eine Blockade des Kontrollkanals (CCH) verhindert. Die größte Herausforderung stellt aber das Thema Security dar. Hundertprozentige Sicherheit ist nicht zu erreichen, was die Einführung von weiter reichenden Visionen wie einen „Selbstorganisierenden Straßenverkehr“ oder „Konvoifahrten“ erschwert.

Neben vielen Eigenschaften, in denen sich VANETs und die Kommunikation in Zellularen Transportsystemen ähneln (wie mobile, frei navigierende Teilnehmer, Echtzeitanforderungen oder unterschiedliche Datenklassen), gibt es auch bedeutende Unterschiede zwischen beiden Anwendungsdomänen. So sind die Geschwindigkeiten der Teilnehmer in einem VANET um etwa den Faktor zehn größer als bei den Transportfahrzeugen einer Zellularen Fördertechnik. Auch die geografische Größe und damit die erforderlichen Funkreichweiten unterscheiden sich in beiden Anwendungen stark (VANET: 1.000 m / ZFT: max. 50 m). Und schließlich sollen in Car-to-X-Netzwerken zunächst nur Hinweisdaten übermittelt werden, d.h. der Mensch ist immer noch als steuerndes Element vorhanden. Dieser sollte sich allerdings auf sicherheitsrelevante

Hinweise (z.B. „Fahrzeug im toten Winkel“) verlassen können. Die Steuerung der ZFT-Fahrzeuge (und damit das Verhalten des Gesamtsystems) ist dagegen zu großen Teilen von externen Nachrichten (Zielkoordinaten, Warnmeldungen, Not-Aus) abhängig. Die Forderung nach korrekten und rechtzeitigen Informationen kann somit eigentlich als Gemeinsamkeit beider Systeme gesehen werden, allerdings mildert der Faktor Mensch diese Anforderung in Car-2-X-Netzwerken ab.

### 3 Anforderungsanalyse

In einem ersten Schritt erfolgt die Auswahl eines geeigneten Einsatzszenarios für die Untersuchung eines fördertechnischen Fahrzeugkollektivs. Anhand des Szenarios werden einzelne Prozessschritte bestimmt, für die der Einsatz eines Zellularen Transportsystems sinnvoll erscheint. Die gewählten Teilprozesse wiederum bestimmen die Anforderungen an Steuerungsalgorithmen (Abschnitt 5) und Kommunikationskonzepte (Abschnitt 6) für eine Zellulare Fördertechnik. Das gewählte Referenzszenario und dessen prozessbedingte Anforderungen haben somit großen Einfluss auf die Gestaltung sämtlicher Lösungskonzepte in diesem Bericht.

#### 3.1 Referenzszenario

Es wird nach einem Referenzszenario gesucht, in dem typische fördertechnische Aufgabengebiete (z.B. innerbetrieblicher Transport, Verteilen/Zusammenführen, Sortierung) zu finden sind. Als gut geeignetes, vielseitiges Szenario sind die internen Warenflüsse in Distributionszentren (auch *Warenverteilzentren* oder *Distributionslager*) zu bewerten. Distributionszentren und -lagern kommt eine Schlüsselrolle an mehreren Stellen des Güterflusses zu (vgl. Abbildung 3-1).

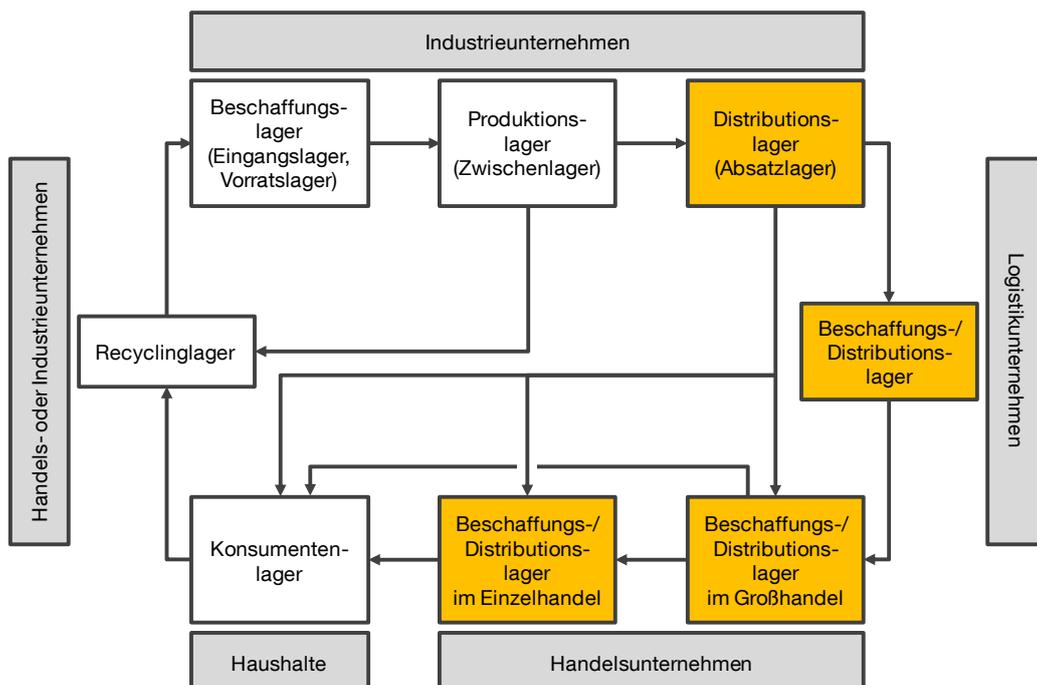


Abbildung 3-1: Lagerbestände beim Güterfluss durch den Absatzkanal [Pfo-2010, S. 88]

Zudem sind die Logistikprozesse in Distributionszentren im besonderen Maße von einem Anstieg an Komplexität und Dynamik betroffen, da hier die Schwankungen und Unwägbarkeiten im Bestellverhalten der Kunden abgedeckt und ausgeglichen werden müssen. Und nicht zuletzt finden sich in Lagerhäusern eine Vielzahl unterschiedlicher fördertechnischer Prozesse in bzw. zwischen den verschiedenen Funktionsbereichen, welche potenzielle Einsatzfelder für eine Zellulare Fördertechnik darstellen.

Der Abgrenzung des Begriffs „Distributionszentrum“ kann folgende Definition dienen:

„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**. Hier wird auch oft **Cross-Docking** betrieben.“ [LOG-2012]

Cross-Docking bezeichnet eine spezielle Distributionsstrategie, bei der An- und Auslieferung zeitlich so abgestimmt sind, dass Waren nicht mehr eingelagert, sondern lediglich umkommissioniert und auf die Ausliefer-Lkw geladen werden müssen [Wil-2009]. Lager- und Kommissionierbereiche sind somit beim Cross-Docking nicht vorgesehen. Hierdurch lassen sich eine Reduktion der Bestände sowie eine Beschleunigung des Warenflusses erreichen. Auch die mit dem Cross-Docking verbundenen Transportprozesse sind als Einsatzfeld für eine Zellulare Fördertechnik denkbar. Dieser Spezialfall soll aber an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden.

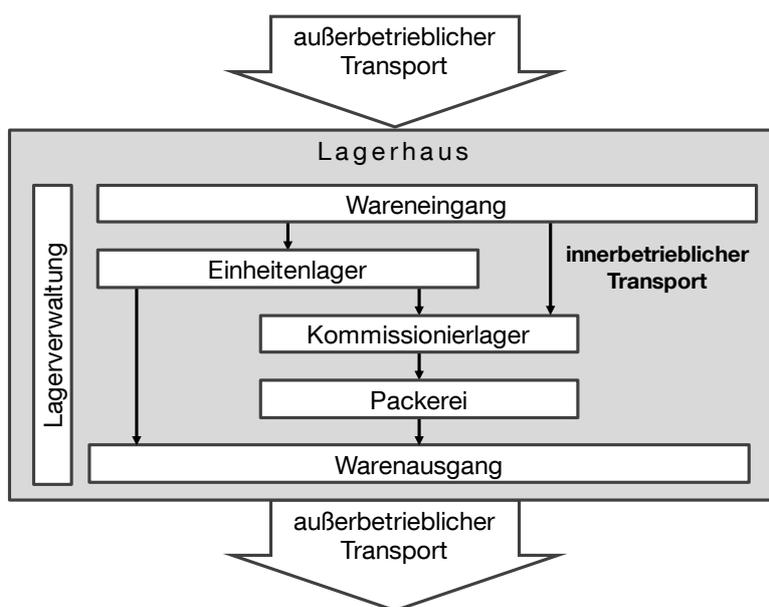


Abbildung 3-2: Lagerhausbereiche (in Anlehnung an [Bow-1996, S. 397])

In allen anderen Ausprägungen von Warenverteilzentren lassen sich allgemein die folgenden Funktionsbereiche unterscheiden (Abbildung 3-2):

- Hofmanagement
- Wareneingang
- Lagerbereiche
- Kommissionierung
- Konsolidierung und Verpackung
- Warenausgang

Wie oben erwähnt stellen sowohl die fördertechnischen Prozesse innerhalb einzelner Funktionsbereiche als auch die Transporte zwischen den verschiedenen Bereichen potenzielle Einsatzfelder für ein Kollektiv autonomer Transportfahrzeuge dar. Das Szenario „Warenflüsse in Distributionszentren“ bietet somit eine aussagekräftige Basis für die Analyse prozessbedingter Anforderungen.

**Tabelle 3-1: Einsatzmöglichkeiten einer Zellularen Fördertechnik in logistischen Prozessen**

++	+	○	-	-
Fördern	Sortieren	Handhaben	Lagern	Kommissionieren
Verteilen / Zusammenführen	Puffern	Prüfen	Transportieren (über weite Strecken)	Verpacken

Alle in Tabelle 3-1 aufgelisteten Prozesse – mit Ausnahme von „Transportieren (über weite Strecken)“ – lassen sich im gewählten Referenzszenario eines Distributionszentrums abbilden. Zusätzlich kann auch die Möglichkeit eines bereichsübergreifenden Einsatzes eines Fahrzeugkollektivs im gewählten Szenario durch eine Verknüpfung von Wareneingang, Lagervorzone, Kommissionierung, Verpackung und Warenausgang überprüft werden. Der Prozess „Fördern“ verbindet all diese Bereiche und lässt sich durch eine Zellulare Fördertechnik realisieren. Im Folgenden wird die in Tabelle 3-1 dargestellte Bewertung näher erläutert:

- Das **Fördern (innerbetrieblicher Transport)** von der Quelle zum Zielpunkt ist Kernaufgabe einer Zellularen Fördertechnik.
- Der Prozess **Verteilen/Zusammenführen** von Waren kann vom Fahrzeugkollektiv abgebildet werden.

- Das **Puffern** kann durch langsames Fahren oder Anhalten im Fall von Stauungen an den Übergabepunkten abgebildet werden.
- Der Prozess **Sortieren** kann durch das Überholen einzelner Fahrzeuge erreicht werden.
- Für die Prozesse **Prüfen** und **Handhaben** ist eine Zellulare Fördertechnik bedingt geeignet, abhängig von zusätzlichen Ausstattungsmerkmalen wie z.B. einer RFID-Antenne, einer Wiegeeinrichtung oder einem aktiven Lastaufnahmemittel in Form eines Manipulators.
- Das **Lagern** von Gütern würde eine dauerhafte Belegung einzelner Fahrzeuge nach sich ziehen und kann damit durch eine Zellulare Fördertechnik nicht wirtschaftlich sinnvoll realisiert werden. Das Ein- und Auslagern von Gütern stellt allerdings eine spezielle Ausprägung des Förderprozesses dar und kann daher durch die Zellulare Fördertechnik abgebildet werden (vgl. Multishuttle Move [Kam-2011]).
- Für das **Transportieren über weite Strecken** (außerhalb des Betriebsgeländes) sind die Fahrzeuge einer Zellularen Fördertechnik nicht vorgesehen und auch nicht geeignet.
- Ebenfalls ungeeignet sind die Fahrzeuge für die Prozesse **Kommissionieren** und **Verpacken**, welche entweder manuell geprägt sind oder durch spezialisierte Automaten durchgeführt werden.

Innerhalb des Szenarios „Distributionszentrum“ wird der Fokus auf den Funktionsbereich „Kommissionierung“ gelegt, da dieser hohe Anforderungen an die eingesetzte Fördertechnik hinsichtlich Leistung und Zuverlässigkeit stellt, denen auch eine Zellulare Fördertechnik genügen muss. Es soll daher gezeigt werden, dass sich ein autonom agierendes Fahrzeugkollektiv für den Behältertransport in Kommissioniersystemen nach dem Bereitstellprinzip Ware-zum-Mann (WzM) einsetzen lässt.

In derartigen Systemen werden dem Kommissionierer die Artikel aus einem automatischen Kleinteilelager (AKL) oder einem automatischen Paletten-Hochregallager (HRL) an seinem Kommissionierplatz dynamisch über eine automatisierte Fördertechnik bereitgestellt (Abbildung 3-3). Die Bereitstellung erfolgt meist artikelrein. Werden nicht alle Artikel aus der Bereitstelleinheit (z.B. Kleinladungsträger, Palette)

entnommen, so wird die Bereitstellereinheit als sogenannte Anbrucheinheit wieder eingelagert. Komplette geleerte Behälter oder Paletten müssen schließlich aus dem Kommissionierkreislauf ausgeschleust und ggfs. erneut befüllt werden.

Die Vorteile im Vergleich zu Mann-zur-Ware-Systemen (MzW), in denen sich der Kommissionierer selbst oder mit mechanischen Hilfsmitteln zu den ortsfesten Lagerplätzen bewegt, liegen in reduzierten Wegzeiten der Kommissionierer, einem erhöhten Nutzungsgrad des vorhandenen Lagervolumens und in der Möglichkeit, die Kommissionierarbeitsplätze nach ergonomischen Gesichtspunkten zu optimieren. Der hohe Automatisierungsgrad schlägt sich allerdings in erhöhten Investitionskosten nieder.

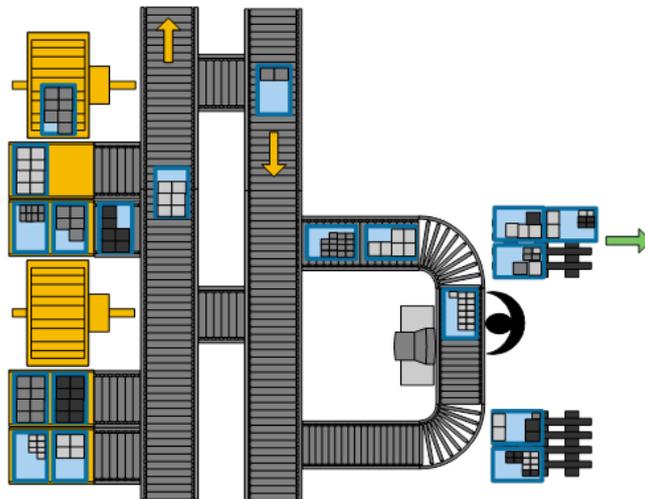
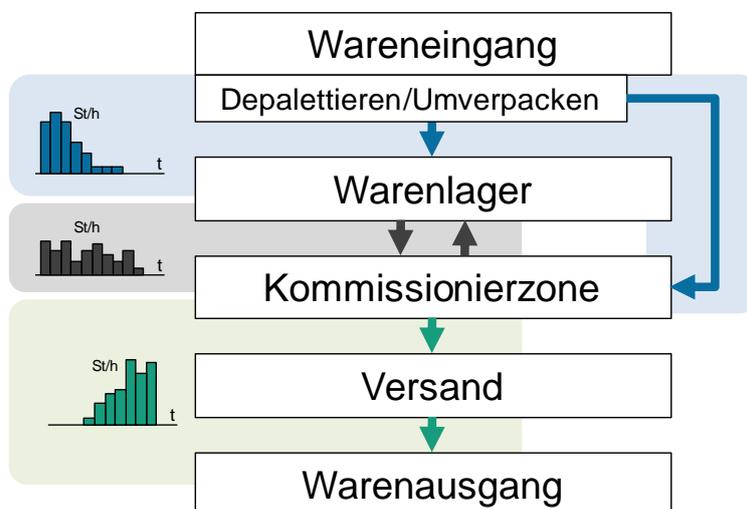


Abbildung 3-3: Ware-zum-Mann(WzM)-Prinzip (Bildquelle: fml)

### Bereichsübergreifender Einsatz Zellularer Transportsysteme

Daher ist stets ein hoher Auslastungsgrad automatisierter Systeme anzustreben, um durch eine verbesserte Leistungsfähigkeit und Lieferqualität rasch den Break-even Point zu erreichen. Im Fall einer Zellularen Fördertechnik lässt sich die Auslastung der einzelnen Fahrzeuge ggfs. durch einen Einsatz über Funktionsbereichsgrenzen hinweg steigern. So könnten die Fahrzeuge für Transporte zwischen zwei Bereichen genutzt werden oder zwischen verschiedenen Bereichen wechseln und – sozusagen als „Springer“ – unterschiedliche Aufgaben übernehmen. So könnten die autonomen Fahrzeuge beispielsweise in der Lagervorzone eingesetzt werden und gleichzeitig den Materialfluss aus der Wareneingangszone bzw. zur Warenausgangszone realisieren, wobei einzelne Fahrzeuge je nach aktueller bzw. prognostizierter Auftragslast ihren Einsatzort anpassen. Auf diese Weise lassen sich untertags im Distributions-

zentrum auftretende Durchsatzschwankungen (Abbildung 3-4) ausgleichen, ohne dass für die Spitzenlasten Leistungsreserven in Form zusätzlicher Fördertechnik vorgehalten werden müssen.



**Abbildung 3-4: Bereichsabhängige Durchsatzschwankungen im Tagesverlauf**

Inwiefern ein bereichsübergreifender Einsatz der Zellularen Fördertechnik möglich ist, hängt einerseits von den in den einzelnen Funktionsbereichen verwendeten Ladehilfsmitteln (KLT, Paletten, Sonderbehälter, Versandeinheiten, Pakete) und andererseits von der Möglichkeit ab, diese mit dem Lastaufnahmemittel der Transportfahrzeuge (einzeln oder im Transportcluster) zu transportieren. Die wirtschaftlichen Vorteile dieser Einsatzstrategie gilt es allerdings noch zu evaluieren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich durch einen bereichsübergreifenden Einsatz Zellularer Transportsysteme prinzipiell kurzfristige Durchsatzschwankungen in verschiedenen Funktionsbereichen ohne das Vorhalten unnötiger Leistungsreserven ausgleichen lassen. Dieses Betriebskonzept kann die Auslastung der Fahrzeuge verbessern. Saisonale Schwankungen können über eine Skalierung der Fahrzeuganzahl abgefangen werden.

Negativ ist an diesem Konzept ein evtl. auftretender zusätzlicher Flächenbedarf für spezielle Fahrwege zwischen den Bereichen zu bewerten. Kann dieser durch eine Nutzung vorhandener Fahrwege vermieden werden, so besteht eine zusätzliche Gefahr von Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern (FTF, Stapler, Personen). Bei weiten Fahrwegen zwischen den Bereichen sind die einzelnen Fahrzeuge lange blockiert, was sich negativ auf den Durchsatz pro Fahrzeug auswirkt. Und im Falle unidirektionaler Materialströme müssen zudem weite Leerfahrten in Kauf genommen wer-

den. Ein bereichsübergreifender Einsatz erfordert zusätzliche Infrastruktur für Fahrzeugnavigation und -kommunikation in den verschiedenen Bereichen des Distributionszentrum. Ein hoher Grad an Dezentralität und Autonomie bei der Wegfindung, Steuerung und Kommunikation der Fahrzeuge könnte jedoch den Bedarf an Infrastruktur auf ein Mindestmaß reduzieren. Im Extremfall komplett dezentral gesteuerter Fahrzeuge mit autonomer Navigation (ermöglicht beispielsweise durch maschinelles Sehen), welche über spontane, sich selbst organisierende Funknetzwerke (ähnlich wie drahtlose Sensornetze) untereinander kommunizieren, käme eine Zellulare Fördertechnik schließlich ohne jede Infrastruktur aus. Festzuhalten bleibt abschließend, dass ein bereichsübergreifender Einsatz Zellularer Transportsysteme theoretisch möglich ist und interessante Betriebskonzepte zulässt. Die tatsächliche Machbarkeit sowie die Wirtschaftlichkeit gilt es aber abhängig vom Anwendungsfall zu prüfen.

### 3.2 Analyse der prozessbedingten Anforderungen

Abhängig von ihrer Position im Produktionsnetzwerk fallen Lagerhäusern sehr unterschiedliche Funktionen zu (vgl. Abbildung 3-5). So werden nach [Pfo-2010] Vorratslager, Umschlaglager und Verteilungslager unterschieden. Beim gewählten Referenzszenario eines Warenverteilzentrums handelt es sich nach dieser Einteilung um ein Auslieferungslager, welches durch eine hohe Auflöseleistung und eine Orientierung am Absatzmarkt charakterisiert wird.

Lagerhausarten	wichtigste Funktion	Standorte	Lagergüter
Vorratslager	hohe Lagerkapazität	produktionsorientiert	Material, saisongebundene Halb- und Fertigfabrikate
Umschlaglager	hohe Umschlagsleistung	transportorientiert	Material, Halb- und Fertigfabrikate, Handelsware
Verteilungslager			
-Zulieferungslager	hohe Konzentrationsleistung	beschaffungsorientiert	Material, Handelsware
-Auslieferungslager	hohe Auflöseleistung	absatzorientiert	

**Abbildung 3-5: Unterscheidung von Lagerhausarten nach ihrer Funktion [Pfo-2010, S. 113]**

Ein hoher Lieferbereitschaftsgrad<sup>10</sup> ist daher obligatorisch. Für den innerbetrieblichen Materialfluss leitet sich daraus die Forderung nach einer hohen Termintreue ab. Transportaufträge müssen häufig innerhalb eines definierten Zeitfensters ausgeführt werden. Gleichzeitig soll so wenig Kapital wie möglich in Lagerbeständen gebunden sein. Aus diesen Globalzielen lassen sich prozessbedingte Anforderungen an die Fördertechnik ableiten (vgl. Abbildung 3-6).

Diese prozessbedingten Anforderungen beeinflussen sowohl die technische Umsetzung der Fördertechnik inkl. Lastaufnahmemittel als auch die Kommunikations- und Steuerungskonzepte. Die mechanische und elektrische Gestaltung der eingesetzten Materialflusstechnik ist nicht Gegenstand dieses Berichts. Es sei in diesem Zusammenhang auf die Definition für Zellulare Transportsysteme in Abschnitt 1.2 hingewiesen, welche gerade die Anforderungen der Durchsatz- und vor allem der Layoutflexibilität adressiert. Die Fördergutflexibilität ist abhängig vom Aufbau der Fahrzeuge, deren Lastaufnahmemittel (LAM) sowie von deren Fähigkeit, sich für spezielle Transportaufgaben (z.B. Palettentransport) in einem Cluster zu koordinieren (vgl. [Hip-2009]).



**Abbildung 3-6: Ableitung prozessbedingter Anforderungen an die Fördertechnik in einem Distributionszentrum**

Auf der anderen Seite sind Durchlaufzeiten und Durchsatz im Materialflusssystem direkt von der Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit bei Steuerung und Datenaustausch abhängig. Die sich daraus ergebenden konkreten Anforderungen an die Algorithmen der Fahrzeugsteuerung und die Beschaffenheit eines Kommunikationssystems werden in den beiden folgenden Abschnitten erläutert.

<sup>10</sup> Quotient aus Anzahl zeit- und sachgerechter Auslieferungen und Anzahl Bestellungen [Hom-2011]

### 3.2.1 Technische Anforderungen an die Fahrzeugsteuerung

Die Anforderungen an die Fahrzeugsteuerung ergeben sich aus der Aufgabenstellung der freien Verfahrbareit in drei Achsen ( $x$ ,  $y$ ,  $\varphi$ ). Dabei sind Kollisionen zwischen zwei oder mehreren Fahrzeugen und zwischen Fahrzeugen und Hindernissen zu vermeiden sowie Zielpunkte oder Zielposen mit der jeweils geforderten Genauigkeit anzufahren. Aus diesen primären Anforderungen ergeben sich sekundäre, technische Anforderungen, die im Folgenden kurz beschrieben und in Tabelle 3-2 zusammengefasst werden:

- *Spurtreues Bremsen*: Wird erforderlich, wenn Zielwinkel oder enge Fahrspuren eingehalten werden müssen.
- *Kollisionsvermeidung zwischen Robotern und sensorisch erfassten Hindernissen*: Ist immer dann erforderlich, wenn die Sensoren unerwartete Hindernisse erkennen, denen ausgewichen werden muss oder die umfahren werden müssen.
- *Kollisionsvermeidung zwischen Robotern und a priori bekannten Hindernissen*: Erfordert eine geeignete Bahnplanung, um die Hindernisse zu umfahren.
- *Bahnplanung*: Ist erforderlich, um unter gegebenen Randbedingungen das Ziel ( $x$ ,  $y$ ,  $\varphi$ ) oder ( $x$ ,  $y$ ) zu erreichen.
- *Berücksichtigung der Hüllkurve*: Ist eine Voraussetzung, um platzsparend unter Einhaltung vorgegebener Sicherheitsabstände in einer gegebenen Umgebung zu manövrieren. Die Hüllkurve ist in allen oben beschriebenen Anforderungen zu berücksichtigen.

**Tabelle 3-2: Technische Anforderungen an die Fahrzeugsteuerung**

	Anforderung	Lösungsansatz
A1 <sub>S</sub>	Spurtreues Bremsen	Gekoppelte Regelung der Motordrehzahlen
A2 <sub>S</sub>	Kollisionsvermeidung zwischen Roboter und sensorisch erfassten Hindernisse	Spurtreues Bremsen oder Ausweichen
A3 <sub>S</sub>	Kollisionsvermeidung zwischen Roboter und a priori bekannten Hindernissen	Bahnplanung
A4 <sub>S</sub>	Bahnplanung	Polynome dritten Grades
A5 <sub>S</sub>	Berücksichtigung der Hüllkurve	Hüllkurvenberechnung

Ausgangsbedingung ist ein Fahrzeug mit einem polygonalen Grundriss, einem Differenzialantrieb und einer 360°-Erfassung von Hindernissen, wie sie üblicherweise durch Laserscanner realisiert wird.

#### **3.2.2 Anforderungen an das Kommunikationssystem**

Die Anforderungen, die es bei der Konzeption des Kommunikationssystems zu berücksichtigen gilt, sind ebenfalls durch die Eigenschaften und Anforderungen der förder-technischen Prozesse in einem Logistikzentrum bedingt. Allerdings kommt als weiterer wichtiger Einflussfaktor das Prinzip der Materialflusssteuerung (vgl. Abschnitt 2.2) und somit der konkrete Informationsbedarf der Steuerungsalgorithmen hinzu. Die Steuerungsalgorithmen legen fest, welche Daten unter welchen Zeitvorgaben von Fahrzeug zu Fahrzeug bzw. zu anderen Systemkomponenten (z.B. Leitsteuerung, Lastübergabestationen) übermittelt werden müssen. Die Steuerungen der einzelnen Fahrzeuge benötigen zugeschnittene Informationen, welche von einem Kommunikationssystem rechtzeitig und vollständig zur Verfügung gestellt werden müssen.

Somit stellt die bedarfsgerechte (richtiger Zeitpunkt, richtige Qualität) Bereitstellung der von den Kommunikationsteilnehmern benötigten Informationen eine grundlegende Anforderung an das Kommunikationssystem dar ( $\rightarrow$  *Anforderung A1<sub>K</sub>*). Daher erfolgt in Abschnitt 6.1 zunächst eine Analyse und Klassifizierung der in einem Materialflusssystem vorhandenen Daten hinsichtlich ihrer Relevanz für den Betrieb eines Zellularen Transportsystems.

Die hohe Mobilität der Transportfahrzeuge einer Zellularen Fördertechnik muss vom Kommunikationssystem unterstützt werden ( $\rightarrow$  *Anforderung A2<sub>K</sub>*). Daraus ergibt sich die Forderung nach vollständiger Mobilität von Sende- und Empfangseinheiten. Diese Forderung gilt zwar nicht für die stationären Teilnehmer in einem Zellularen Transportsystem wie Lastübergabestationen oder andere Peripherieeinrichtungen, ist aber dennoch bei der Ausgestaltung des Kommunikationskonzepts von zentraler Bedeutung, da sie die Auswahl des Übertragungsmediums und somit der Kommunikationstechnologie stark beeinflusst. Konkret heißt das, dass drahtgebundene Lösungen für die in diesem Projekt betrachtete Kommunikation zwischen bzw. mit den Fahrzeugen nicht in Frage kommen.

Weitere Herausforderungen für das Kommunikationssystem sind mit dem Einsatz in einem industriellen Umfeld verbunden ( $\rightarrow$  *Anforderung A3 $\kappa$* ). Dies hat unter Umständen Einfluss auf die Auswahl bzw. Gestaltung elektrischer Komponenten (z.B. Schutz vor Staub/Schmutz/Spritzwasser, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Explosionsschutz). Im Fall von drahtlosen Kommunikationstechniken kommen Aspekte wie die Abschattung des Signals beispielsweise durch Wände oder Stahlträger hinzu. Und da immer häufiger Funktechnologien wie WLAN auch in Produktionsstätten und Logistikzentren eingesetzt werden, ist ggfs. auch die Koexistenzfähigkeit mit diesen anderen Kommunikationssystemen zu berücksichtigen.

Als weitere Anforderung wird die Wirtschaftlichkeit des Kommunikationssystems formuliert ( $\rightarrow$  *Anforderung A4 $\kappa$* ). Diese soll einhergehen mit dem Einsatz anbieterunabhängiger Komponenten und Standards. Es wird daher eine offene Struktur ohne proprietäre Lösungen oder Erweiterungen angestrebt.

Die zu steuernden Abläufe innerhalb eines Zellularen Transportsystems benötigen prozessrelevante Informationen in Echtzeit ( $\rightarrow$  *Anforderung A5 $\kappa$* ). Daher muss auch das Kommunikationssystem einen Datenaustausch in Echtzeit ermöglichen. Echtzeitfähigkeit setzt die Reaktion eines Systems auf ein äußeres Ereignis in vorbestimmbarer Zeit voraus. Es darf daher nicht aufgrund zu spät eintreffender Nachrichten zu Verzögerungen im technischen Prozess kommen. Es ist hierbei zu beachten, dass die Zeitvorgaben für die Datenübertragung auch von der Geschwindigkeit der Datenverarbeitung beim Empfänger abhängt. Eine langsame Verarbeitung der Daten kann dazu führen, dass trotz rechtzeitiger Übermittlung der Information über das Kommunikationssystem das System zu spät, also nicht in Echtzeit, reagiert.

Die Konsequenzen eines Nichteinhaltens der Kommunikation in Echtzeit können sehr unterschiedlich sein: Während sich bei weichen Echtzeitanforderungen ein Überschreiten der definierten Zeitvorgaben lediglich in störenden, nicht aber in systemkritischen Effekten äußert (z.B. Videokonferenzsystem), sind im Fall harter Echtzeitanforderungen Fristverletzungen nicht tolerierbar (z.B. elektronische Motorsteuerung). Harte Echtzeitanforderungen sind bei der Kommunikation innerhalb Zellularer Transportsysteme jedoch die Ausnahme. So werden hart echtzeitkritische Aufgaben wie Positioniervorgänge oder die Vermeidung von Kollisionen i.d.R. über Fahrzeuginterne echtzeitfähige Feldbussysteme zwischen Antrieb, Wegmesssystem und Steuerung übernommen. Weiche Echtzeitanforderungen gelten allerdings für jegli-

chen Datenaustausch (z.B. Auftrags-, Statusinformationen) innerhalb eines Zellularen Transportsystems. Die Folgen fehlender Echtzeit-Kommunikation können von einer stockenden Visualisierung bis hin zu unnötig stillstehenden Fahrzeugen und damit verbundenen Leistungseinbußen reichen.

Eng verknüpft mit der Forderung nach Echtzeitfähigkeit ist die Forderung nach einer hohen Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit des Kommunikationssystems ( $\rightarrow$  *Anforderung A6<sub>K</sub>*). Sowohl für drahtgebundene als auch für drahtlose Kommunikationstechnologien lassen sich Aussagen zu diesen beiden Kriterien aus vorhandenen Kennwerten (z.B. Paketverlustrate, Paketfehlerrate, Signalstärke) und dem eingesetzten Medienzugriffsverfahren (z.B. CSMA/CD, Token-Passing) ableiten. Ein hohes Maß an Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit ist Grundvoraussetzung für Echtzeitverhalten.

Nicht zu vernachlässigen ist das Thema Datensicherheit (Security) beim Austausch von Informationen ( $\rightarrow$  *Anforderung A7<sub>K</sub>*). Gerade für offene Systeme wie drahtlose Netzwerke sind Maßnahmen wie die Verschlüsselung der übertragenen Daten oder Zugriffskontrollen (Authentifizierung, Autorisierung) vorzusehen. Auf entsprechende Mechanismen ist bei der Auswahl eines Kommunikationsstandards zu achten.

Die Komponenten eines Kommunikationssystems müssen mit ausreichender Energie versorgt werden, um das Kommunikationsnetz und somit die Fähigkeit zum Datenaustausch aufrecht zu erhalten ( $\rightarrow$  *Anforderung A8<sub>K</sub>*). Prinzipiell muss die Energieversorgung der Sende-/Empängereinheiten an den Fahrzeugen unabhängig von einem Stromnetz erfolgen. Dies kann durch eine Stromversorgung per Batterie erreicht werden. Da die Fahrzeuge einer Zellularen Fördertechnik in der Regel eigene Energiespeicher für Aktorik und Sensorik mit sich führen (bspw. in Form eingebauter Akkumulatoren), bietet es sich an, auch die Komponenten des Kommunikationssystems an dieses Bordspannungsnetz anzuschließen. Zusätzliche Problemstellungen wie der Batterieaustausch und die Überwachung der Batterielebensdauer können auf diese Weise umgangen werden.

Die abgeleiteten Anforderungen an das Kommunikationssystem einer Zellularen Fördertechnik sind in Tabelle 3-3 zusammengefasst.

**Tabelle 3-3: Anforderungen an das Kommunikationssystem**

	Anforderung	Lösungsansatz
A1 <sub>K</sub>	Bedarfsgerechte Bereitstellung benötigter Informationen	Datenanalyse und -klassifizierung
A2 <sub>K</sub>	Vollständige Mobilität für Sender/Empfänger	Drahtlose Kommunikation
A3 <sub>K</sub>	Einsatz in industriellem Umfeld	Funkplanung zur Gewährleistung der Koexistenz mit anderen Kommunikationssystemen
A4 <sub>K</sub>	Wirtschaftlichkeit, Anbieterunabhängigkeit	Interoperabilität/Interchangeability → offene Struktur, keine proprietären Lösungen
A5 <sub>K</sub>	Kommunikation in Echtzeit	Berücksichtigung von Kenngrößen (z.B. Latenzzeit, Deterministik) zur Charakterisierung der Echtzeitfähigkeit
A6 <sub>K</sub>	Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit	Berücksichtigung entsprechender Kenngrößen (z.B. Signalstärke, Paketfehlerrate)
A7 <sub>K</sub>	Datensicherheit/Security	Verschlüsselung, Zugriffskontrolle für drahtlose Geräte, sichere Kopplung zu übergeordneten Netzwerken
A8 <sub>K</sub>	Energieversorgung	Energieversorgung über Fahrzeugbatterie

Darüber hinaus bietet die NAMUR<sup>11</sup>-Empfehlung 124 [NE124] einen ausführlichen Überblick über Voraussetzungen für einen zuverlässigen und wirtschaftlichen Einsatz von Drahtlostechiken in der Prozessindustrie. Die NAMUR-Empfehlung beschreibt in diesem Zusammenhang Mindestanforderungen an Technologien und Gerätetechnik und gibt Hinweise und Empfehlungen für den Einsatz in der betrieblichen Praxis. Trotz der Fokussierung auf verfahrenstechnische Prozesse sind viele der Anforderungen auch auf den Einsatz drahtloser Kommunikationstechnik in Prozessen der Intralogistik übertragbar.

### 3.3 Zusammenfassung

Als Referenzszenario für den Einsatz eines fördertechnischen Fahrzeugkollektivs wird der Warenfluss innerhalb eines Distributionszentrums gewählt. Aus den Rahmenbedingungen und den prozessbedingten Anforderungen werden konkrete Anforderungen an die Steuerung und die Kommunikation der autonomen Fahrzeuge abgeleitet. Ausgehend von diesen Anforderungen an die Fahrzeugsteuerung und an den Datenaustausch innerhalb des Fahrzeugverbunds sowie mit der Peripherie erfolgt in

<sup>11</sup> Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie

### 3 Anforderungsanalyse

---

den folgenden Abschnitten die Entwicklung angepasster Steuerungsalgorithmen (Kapitel 4 und 5) und eines geeigneten Kommunikationssystems (Kapitel 6 und 0).

## 4 Modellbildung und Simulation

### 4.1 Fahrzeugmodell

Das zugrunde gelegte Fahrzeug basiert auf einem Differenzialantrieb mit zwei einzeln angetriebenen Rädern. Die Fahrzeugkinematik berücksichtigt eine unsymmetrische Anordnung der Antriebsachse in Fahrzeuginnenrichtung. Das Fahrzeugmodell berücksichtigt eine Masse und ein Trägheitsmoment und ermöglicht Vorwärts- und Rückwärtsfahrten sowie ein Drehen auf der Stelle. Seitwärtsfahrten sind jedoch nicht direkt möglich, sondern sie können nur durch Rangierfahrten ausgeführt werden.

Alle Bewegungen werden in einen translatorischen und in einen rotatorischen Teil zerlegt. Auf dieser Basis können in den folgenden Arbeitspaketen Regler für die Geschwindigkeit der Antriebsmotoren entworfen werden. Überlagert kann eine Lageregelung und eine Bahnverfolgung realisiert werden.

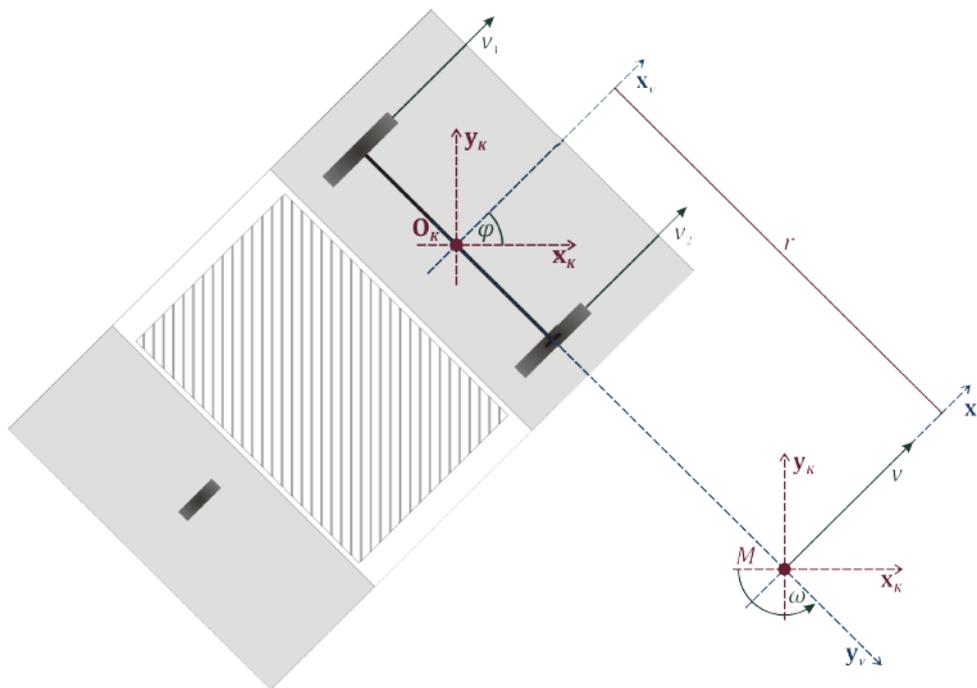
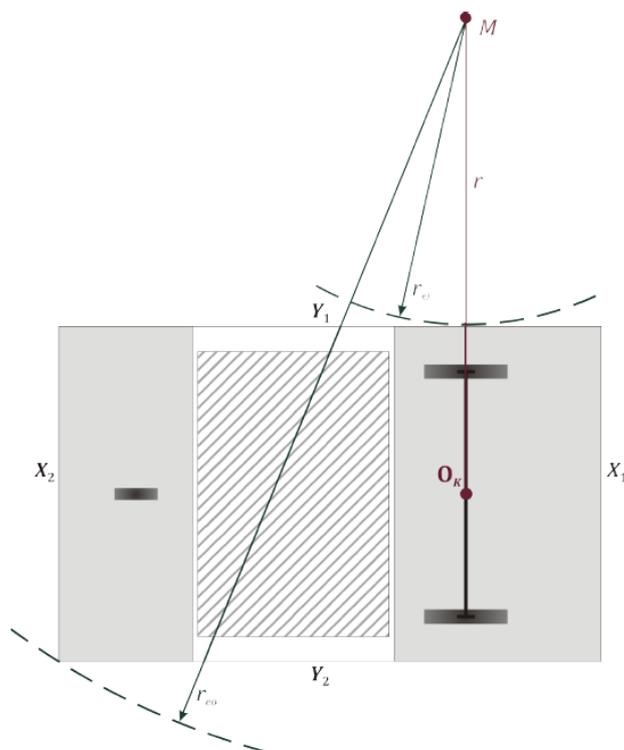


Abbildung 4-1: Lokales Koordinatensystem mit Ursprung im kinematischen Mittelpunkt

Das Fahrzeugmodell stellt ein lokales kartesisches Koordinatensystem zur Verfügung (Abbildung 4-1), in das alle Sensoren eingepasst werden können. Durch geeig-

nete Koordinatentransformationen müssen die Sensordaten in das Koordinatensystem des mobilen Roboters, dessen Bezugspunkt in der Mitte der Antriebsachse und dessen Ausrichtung in der Vorzugsrichtung des Roboters liegt, transformiert werden.



**Abbildung 4-2: Momentanpol M und Bahnradius r**

Der Momentanpol, um den sich das Fahrzeug bewegt, liegt immer auf der  $y$ -Achse (Abbildung 4-2). Damit liegt die Kinematik des Fahrzeugs fest und es ergeben sich bei einer Spurweite  $G$  folgende Beziehungen zwischen den Geschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$  der beiden angetriebenen Rädern einerseits und der Translationsgeschwindigkeit  $v$  und der Rotationsgeschwindigkeit  $\omega$  andererseits.

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = p(\omega)$$

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = p^{-1} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$$

$$p = \begin{pmatrix} 1 & -G/2 \\ 1 & G/2 \end{pmatrix}$$

Der Bahnradius  $r$  ist der Abstand des kinematischen Mittelpunktes  $O_K$  vom Momentanpol.

$$r = \frac{v}{\omega}$$

$$r = \frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1} \cdot \frac{G}{2}$$

Das Fahrzeugmodell selbst ist nur auf zwei Dimensionen ausgelegt, was für die zelluläre Fördertechnik hinreichend genau ist. Aus der Geometrie der Draufsicht des Fahrzeugaufbaus können die für eine Hüllkurvenbetrachtung erforderlichen Daten gewonnen werden.

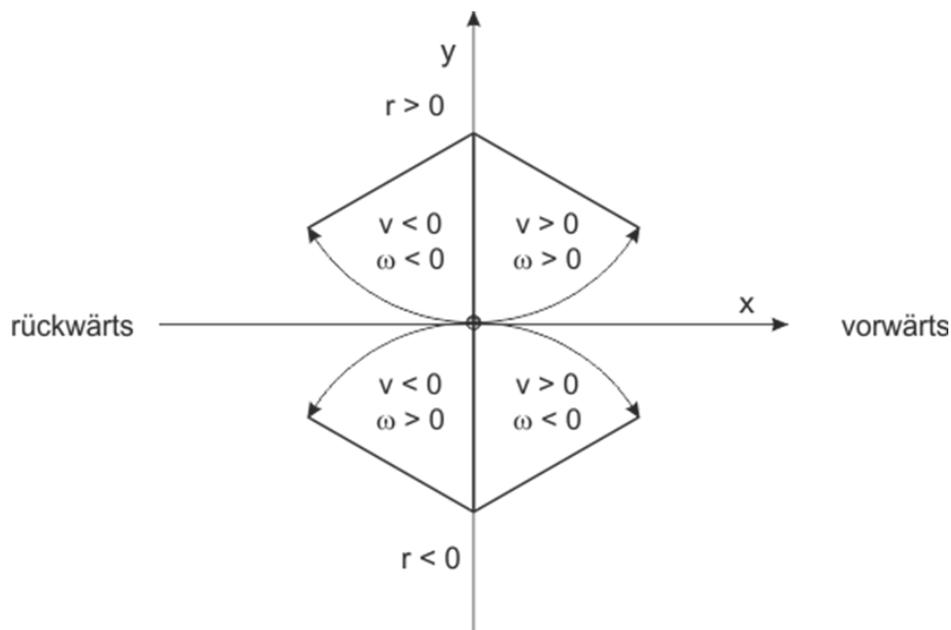


Abbildung 4-3: Bewegungen durch Translation und Rotation

Die folgende Tabelle zeigt einige der dynamischen Aspekte für die Translation und für die Rotation (vgl. Abbildung 4-3).

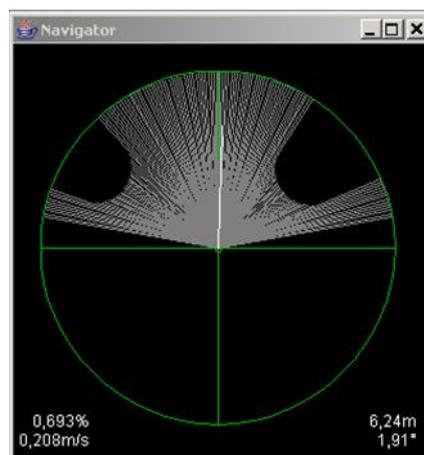
Tabelle 4-1: Dynamik der Translation und der Rotation

Translation	Rotation
$v = a \cdot t$ $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$	$\omega = \alpha \cdot t$ $\varphi = \frac{\alpha}{2} \cdot t^2$
$s_{brake} = \frac{v^2}{2a}$	$\varphi_{brake} = \frac{\omega^2}{2\alpha}$
$v = \sqrt{s_0 \cdot 2a_{max}}$	$\omega = \sqrt{\varphi_0 \cdot 2\alpha_{max}}$

Aus der Drehung der Antriebsräder kann die Eigenbewegung des Fahrzeugs berechnet werden. Das Fahrzeugmodell erlaubt eine solche Auswertung unter Berücksichtigung einer gegebenen Anfangsposition und eines einfachen Fehlermodells. Komplexe Fehlermodelle, die auch ein physisches Rad-Boden-Modell und damit auch Reibung und Schlupf berücksichtigen, sind denkbar, jedoch für den Einsatzfall zu detailliert.

### 4.2 Sensormodelle

Die Sensormodelle verfügen über ein lokales Polarkoordinaten-System und tasten ihre Umgebung in ein, zwei oder drei Dimensionen ab. Dabei verfügen sie über eine Winkelauflösung und einen Öffnungswinkel, die abhängig von der Dimension des Sensors in Radiant oder Steradian angegeben werden. Die Messwerte, die einem Punkt unter gegebenem Winkel zugeordnet werden können, repräsentieren beliebige physische Größen, wie etwa Entfernung oder Helligkeit. Für die Auswertung sind der Messbereich und das Auflösungsvermögen der Messwerte des jeweiligen Sensors wichtig. Diese Parameter bilden die Grundlage für die spätere Auswertung der Sensordaten. In Abbildung 4-4 ist exemplarisch die Visualisierung der Messwerte eines Lasersanners dargestellt.



**Abbildung 4-4: Visualisierung der Messwerte eines Lasersanners**

Zu jedem Sensor gehört auch ein Modell der Messfehler. In der hier zu Grunde liegenden Anwendung, der Zellularen Fördertechnik, werden zunächst nur Gleichverteilungen für die Winkel- und für die Messwertfehler angenommen. Eine spätere Erwei-

terung zu einem komplexen Fehlermodell, das sowohl systematische als auch stochastische Fehler berücksichtigt, ist möglich.

### 4.3 Simulator

Als Simulator wird das Open-Source-Produkt Player/Stage eingesetzt. Dieses Produkt ist sehr flexibel und nach dem Client-Server-Prinzip designt. Die Struktur der Simulationsumgebung ist in Abbildung 4-5 dargestellt.

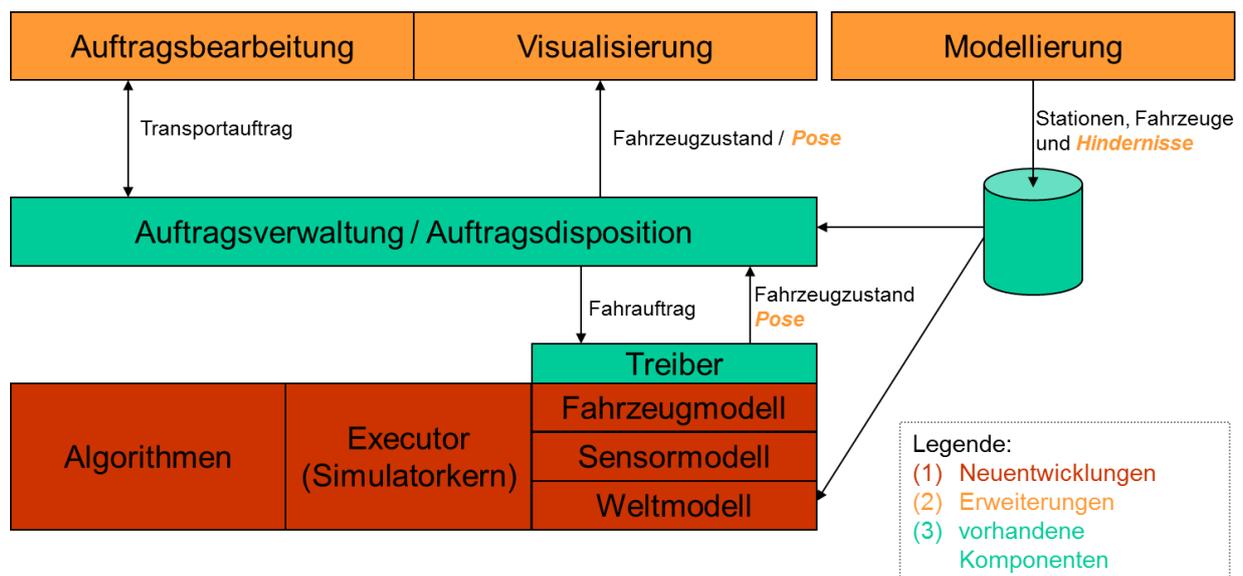
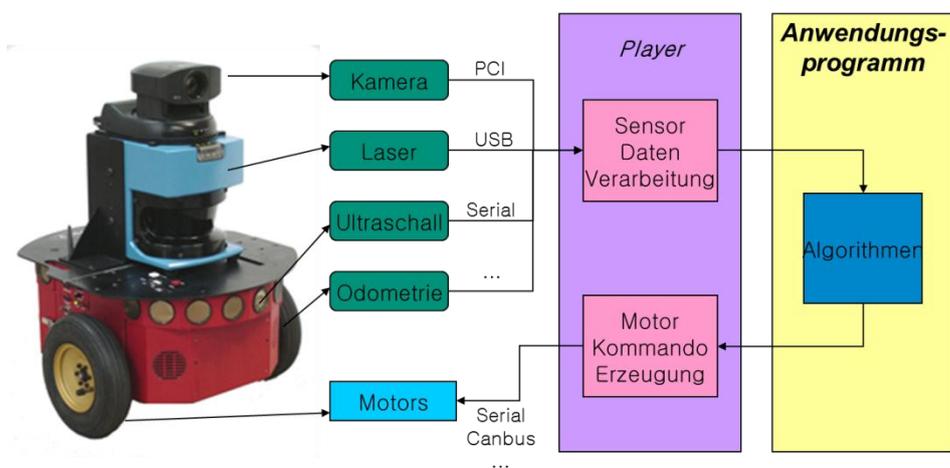


Abbildung 4-5: Komponenten einer Simulationsumgebung für die Zellulare Fördertechnik

Player ist ein Device Server für Sensoren und Aktoren und stellt eine Hardware-Abstraktionsschicht für mobile Roboter dar (Abbildung 4-6).



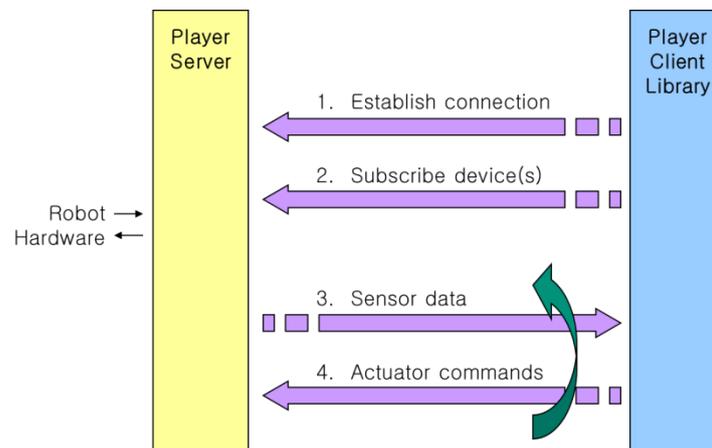
Quelle: Player TutorialCenter for Robotics and Embedded Systems

Abbildung 4-6: Typische Sensoren und Aktoren eines mobilen Roboters

## 4 Modellbildung und Simulation

---

Die Kommunikation zu den Clients erfolgt über TCP-Sockets mit dem Player-Protokoll (Abbildung 4-7). Grundsätzlich können die Algorithmen in einer beliebigen Programmiersprache geschrieben werden, so lange sie über dieses Protokoll an den Server gekoppelt werden. Für C, C++, Python und Java liegen entsprechende Implementierungen vor.



Quelle: Player TutorialCenter for Robotics and Embedded Systems

**Abbildung 4-7: Kommunikation zwischen Player Server, Player Client und Stage**

Stage ist der eigentliche Simulator, der insbesondere das Weltmodell bereitstellt. Dieses besteht aus einem Raster, das üblicherweise als Rastergrafik in einem Standardformat eingelesen wird. Damit unterliegen alle Simulationen einem Diskretisierungsrauschen, das bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollte.



### 5.2 Ausweichverhalten

Ziel des Ausweichverhaltens ist die Vermeidung von Kollisionen unter folgenden Bedingungen:

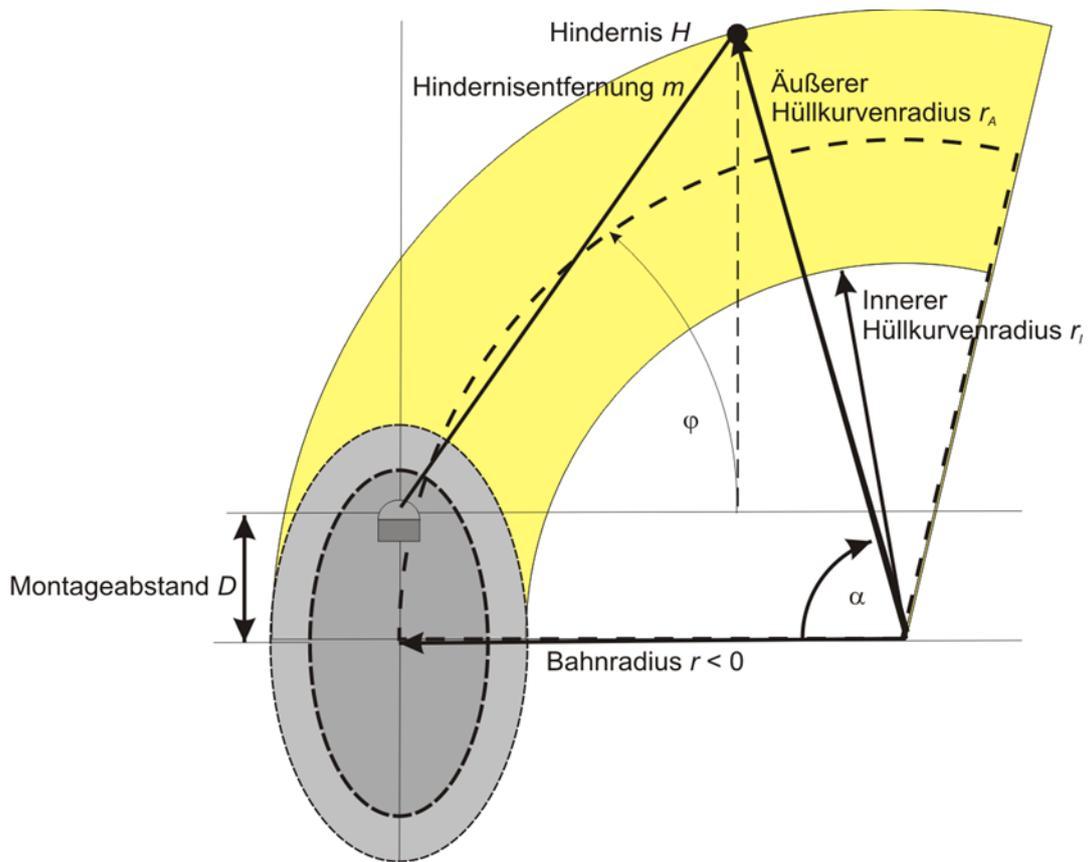
- Das Fahrzeug ist in Bewegung mit einem aktuellen Bahnradius
- In der Hüllkurve liegt mindestens ein Hindernis
- Es wird zunächst von einem Laserscanner ausgegangen

Mögliche Reaktionen auf Hindernisse sind:

- Bremsen
- Ausweichen
- Richtungsumkehr

Basis der Kollisionsvermeidung ist die Erkennung eines Hindernisses durch einen Sensor – hier am Beispiel eines Laserscanners gezeigt. Abbildung 5-2 zeigt ein Hindernis H, das durch einen Laserscanner in Bezug auf Position und Winkel relativ zum kinematischen Mittelpunkt des Roboters erkannt wird.

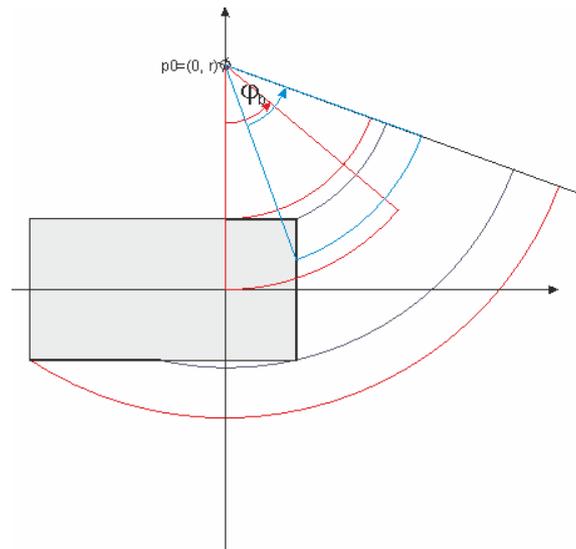
Um nicht mit diesem Hindernis zu kollidieren, wird der Bahnradius nun so bestimmt, dass das Hindernis auf dem äußeren Rand der Hüllkurve liegt. Nebenbedingung ist, dass sich kein weiteres Hindernis in der so bestimmten neuen Bahn befindet. Wenn das der Fall sein sollte, muss dieses neue Hindernis nach dem gleichen Prinzip umfahren werden.



**Abbildung 5-2: Kollisionserkennung unter Berücksichtigung der Hüllkurve**

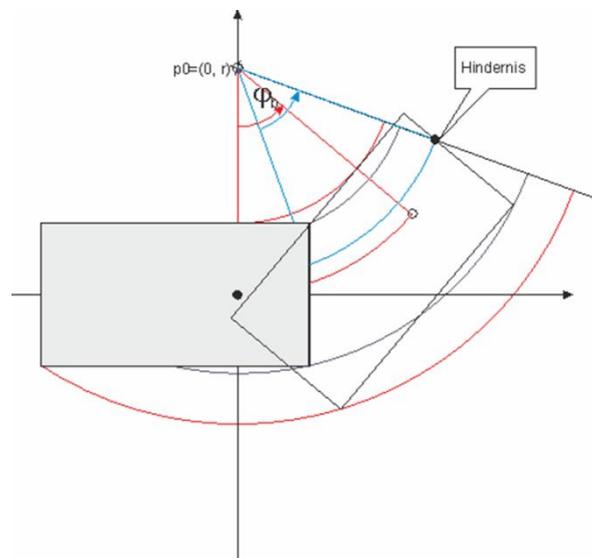
Grundsätzlich können Hindernisse, die sich in der momentanen Hüllkurve befinden, links oder rechts umfahren werden. Wenn zwei Lösungen gefunden werden, ist zu entscheiden, welche genutzt werden soll. Hierzu können sehr unterschiedliche Kriterien, wie beispielsweise minimale Bahnkrümmung oder minimale Lenkbewegung, angewendet werden.

Wenn das oben beschriebene Verfahren keine Lösung liefert, muss das Fahrzeug gebremst werden. Der Bremsvorgang kann, sobald eine Lösung für das Ausweichen gefunden wurde, jederzeit abgebrochen werden. Der späteste Zeitpunkt für das Einleiten einer Bremsung resultiert aus dem freien Weg bzw. aus dem freien Drehwinkel, um den sich das Fahrzeug bewegen kann, bis es zu einer Kollision käme (Abbildung 5-3).



**Abbildung 5-3: Bestimmung des freien Weges und des freien Winkels**

Unter Annahme einer maximalen Translations- und einer maximalen Rotationsbremsbeschleunigung ergibt sich ein maximaler Bremsweg bzw. Bremswinkel. Die Bremsung muss rechtzeitig eingeleitet werden, so dass das Fahrzeug in einem kleinen Sicherheitsabstand von dem Hindernis zum Stillstand kommt (Abbildung 5-4).



**Abbildung 5-4: Bewegung des kinematischen Mittelpunktes bis zur Kollision der Fahrzeugperipherie mit dem Hindernis**

Da das Bremsen nicht die geplante Bahn beeinträchtigen soll, muss der Bremsvorgang spurtreu erfolgen. Abbildung 5-5 zeigt in einem  $v(t)$  – Diagramm die Geschwindigkeiten der beiden Antriebsräder bei einem Bremsvorgang, der jedoch nicht bis zum Stillstand des Fahrzeugs ausgeführt wird.

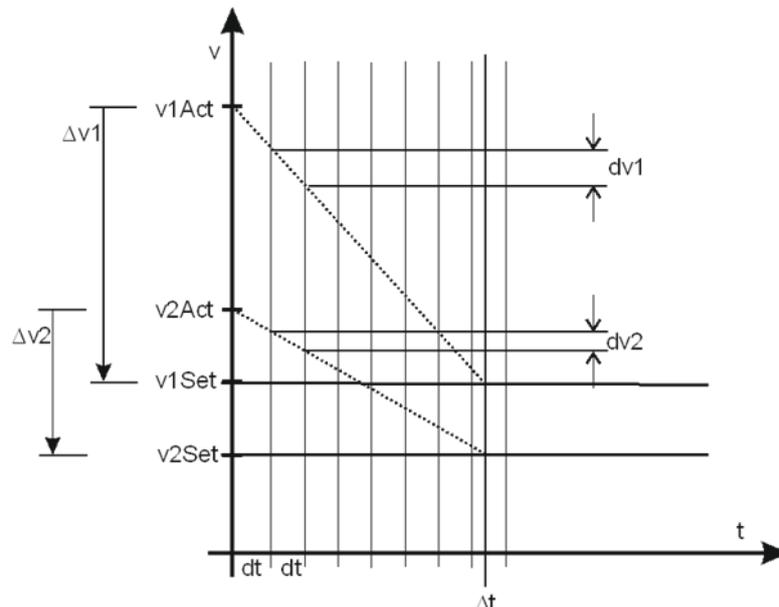
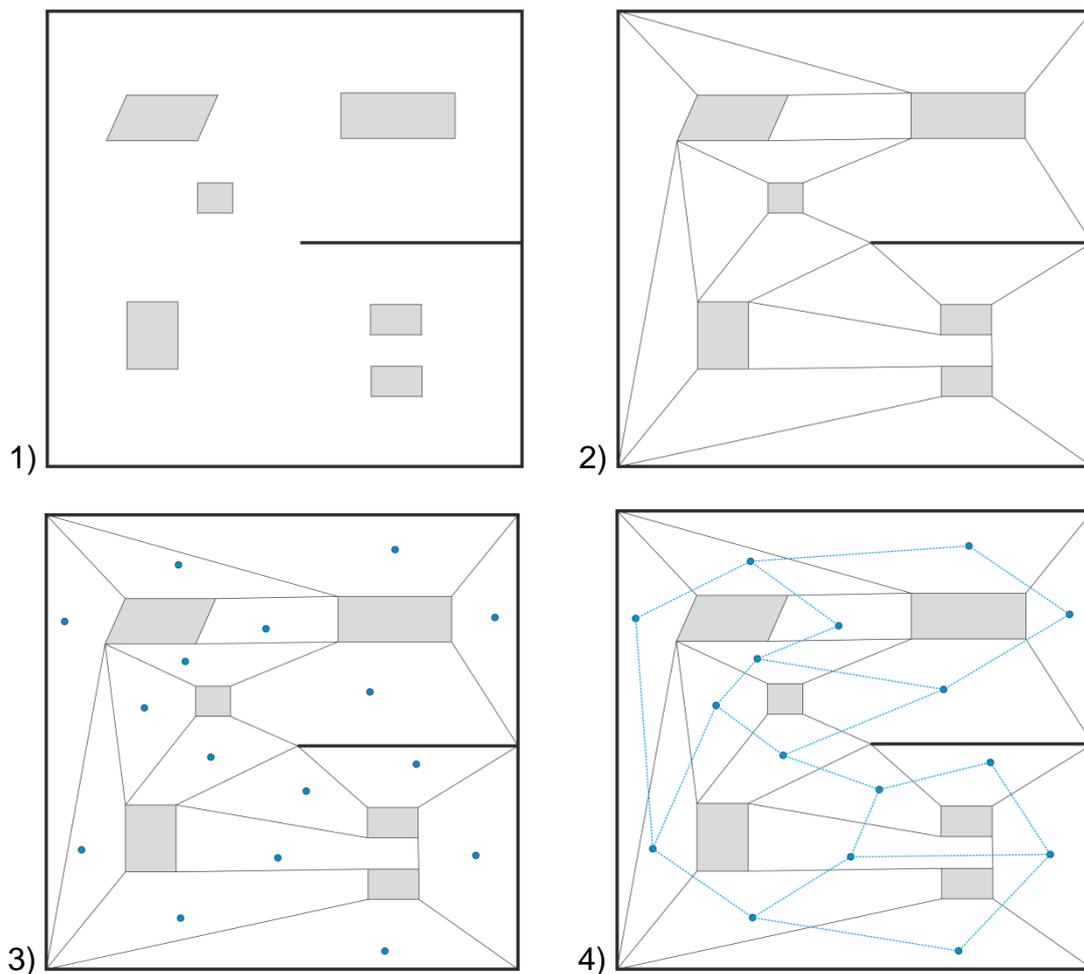


Abbildung 5-5: Spurtreues Bremsen durch konstantes Geschwindigkeitsverhältnis

### 5.3 Wegefingung

Um durch eine gegebene Halle zu fahren, bedarf es eines Wegenetzes. Dieses Netz kann als gerichteter oder als ungerichteter Graph modelliert werden. Im FTS-Bereich wird das Wegenetz in einem Planungsprozess meist manuell erstellt. Um der hohen Dynamik der Zellularen Fördertechnik gerecht zu werden, sollte die Planung des Wegenetzes zur Laufzeit erfolgen.

Ein häufig angewendetes Verfahren beruht auf einer Zerlegung der Fahrfläche in Regionen, die zwischen den Eckpunkten der Hindernisse und der Halle aufgespannt werden. Für jede Region wird nun ein Zentrum bestimmt, das alle Punkte dieser Region repräsentiert. Diese Zentren bilden die Knoten des Wegenetzes, das hierüber aufgespannt wird. In Abbildung 5-6 ist dieses Vorgehen dargestellt.



**Abbildung 5-6: Hallenlayout mit festen Einbauten (1), Segmentierung der Grundfläche (2), Bestimmung der Segmentschwerpunkte (3), Aufspannen eines Wegenetzes (4)**

Um Transporte durchführen zu können, muss für jede Quelle und für jede Senke ein zusätzlicher Punkt in das Wegenetz aufgenommen werden. Dieses Prinzip der Wegfindung ist allgemein bekannt und kann auch für die Zellulare Fördertechnik eingesetzt werden.

## 5.4 Bahnplanung

Der Weg, der einen mobiler Roboter zu seinem Ziel führt, kann durch eine Folge abzufahrender Punkte vorgegeben werden. Möchte man diese Punkte zu einer glatten Kurve verbinden, können analytische Kurven angewendet werden. Im Folgenden wird eine solche Kurve dritten Grades dazu genutzt, einen Weg vom aktuellen Standort des Fahrzeugs zur Zielstation unter Berücksichtigung der geforderten Ausrichtungen am Start- und Ziel zu berechnen (Abbildung 5-7). Weiter unten wird die Berechnung der Parameter einer solchen Kurve beschrieben. Aus dieser Kurve wird

anschließend der Radius des Krümmungskreises im Startpunkt, also der jeweiligen Position des Fahrzeugs, berechnet. Hieraus werden schließlich die (relativen) Drehzahlen der Antriebsräder berechnet und an die unterlagerte Ebene der Regelung weitergereicht.

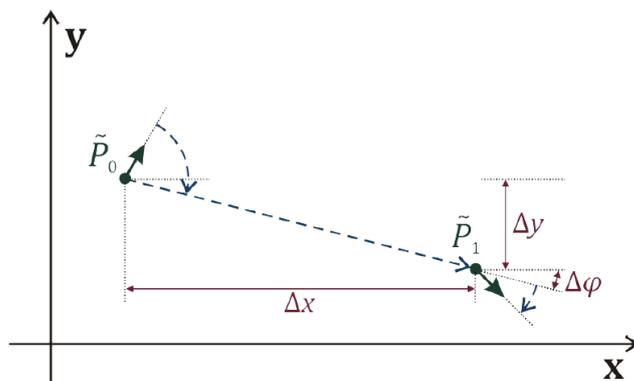


Abbildung 5-7: Fahrten von Pose zu Pose

Die folgenden Abbildungen zeigen einige mögliche Grenzkonstellationen.

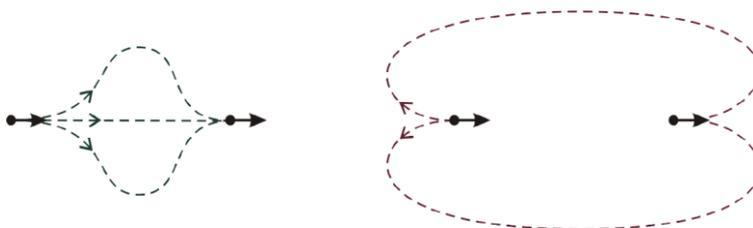


Abbildung 5-8: Vorwärts- und Rückwärtsfahrten zwischen jeweils zwei Null-Grad-Posen, die auf eine Linie liegen

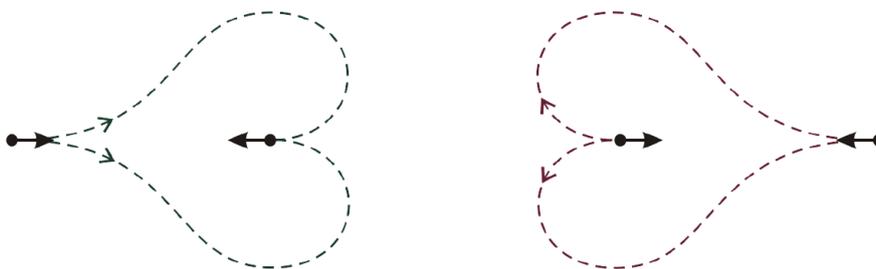
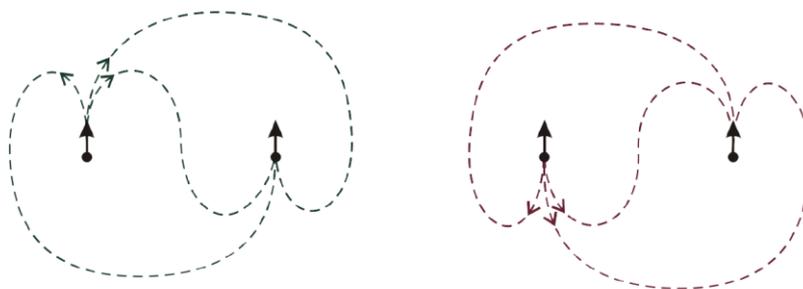
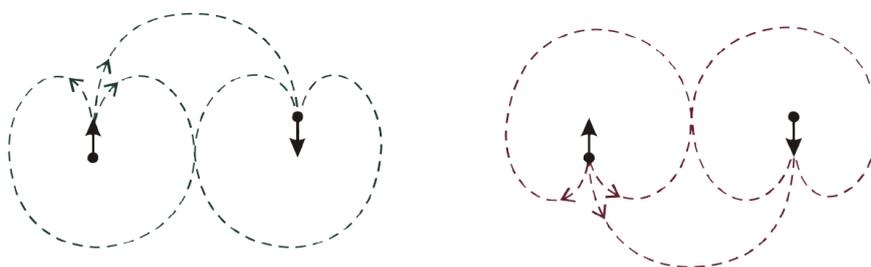


Abbildung 5-9: Vorwärts- und Rückwärtsfahrten zwischen jeweils zwei gegensinnigen Posen, die auf eine Linie liegen



**Abbildung 5-10: Vorwärts- und Rückwärtsfahrten zwischen jeweils zwei gleichsinnigen 90°-Posen, die auf eine Linie liegen**

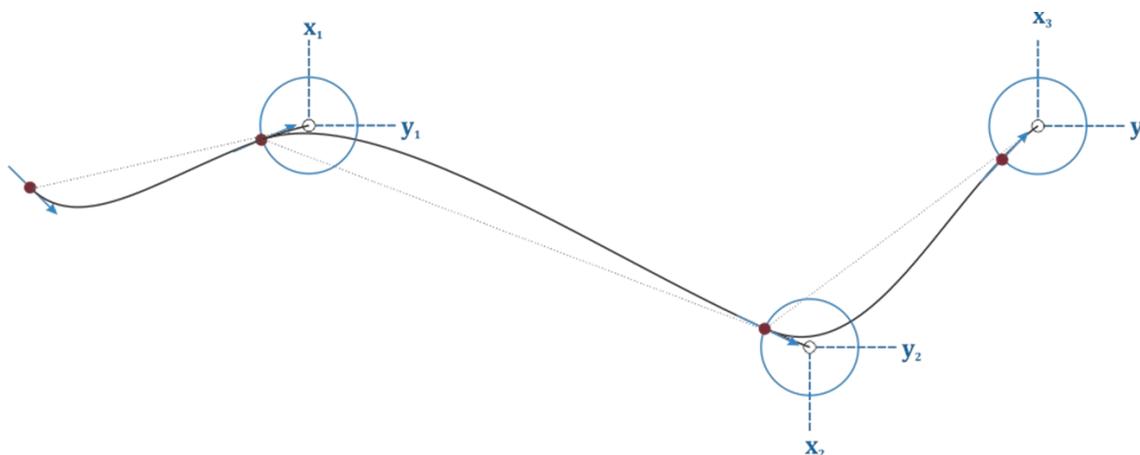


**Abbildung 5-11: Vorwärts- und Rückwärtsfahrten zwischen jeweils zwei gegensinnigen 90°-Posen, die auf eine Linie liegen**

Auf einer Fläche kann ein Fahrzeug über Stützpunkte durch das Wegenetz fahren:

- Polygon über feste Stützpunkte
- Fahrzeugausrichtung wird nicht geregelt
- Fangbereich um einen Stützpunkt

In den meisten Fällen wird erst am Ziel eine Pose gefordert, bei allen Zwischenpunkten reicht deren Annäherung bis auf einen definierten Toleranzbereich. Abbildung 5-12 zeigt einen typischen Verlauf der sich ergebenden Bahnkurve.



**Abbildung 5-12: Abfahren einer Punktsequenz**

Anforderungen an die Bahnplanung und die Bahnregelung sind:

- Berechnung einer geeigneten Kurve
- Bestimmung des Bahnradius im Startpunkt
- Kein Ausweichen bei Hindernissen

Zur Bahnplanung werden Bézierkurven eingesetzt, die über folgende Eigenschaften verfügen:

- Eine Bézierkurve liegt ganz in der konvexen Hülle der zu approximierenden Stützpunkte.
- Jeder Stützpunkt hat Einfluss auf den gesamten Kurvenverlauf einer Bézierkurve.
- Jeder Stützpunkt beeinflusst den ihm zugeordneten Bereich der Kurve am meisten.
- Der Polynomgrad entspricht der Anzahl der Stützpunkte plus Eins.

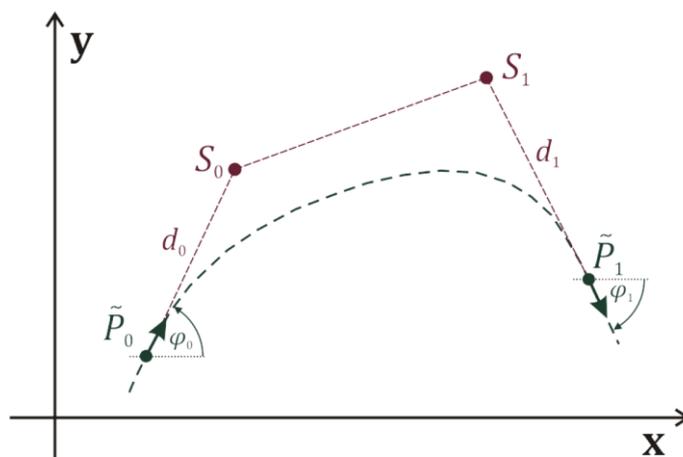


Abbildung 5-13: Bézierkurve zur Bahnplanung

Kurven lassen sich auf drei verschiedene Arten darstellen. Über explizite, implizite oder parametrisierte Funktionen:

Funktionstyp	Allgemeine Form	Beispiel für Kreis
explizit	$f(x) = y$	$f(x) = \pm\sqrt{r^2 - x^2}$
implizit	$f(x, y) = 0$	$x^2 + y^2 - r^2 = 0$
parametrisiert	$x = x(u) \quad y = y(u)$	$x = r \cdot \cos(u) \quad y = r \cdot \sin(u)$

Die explizite Form hat den Nachteil, dass manche Kurven die Eigenschaft besitzen, für einen  $x$ -Wert mehrere  $y$ -Werte zu besitzen. Die implizite Form des Kreises  $x^2 + y^2 - r^2 = 0$  eignet sich nicht, um lediglich ein Halbkreis darzustellen. Hierbei benötigt man eine weitere Bedingung  $y \geq 0$ . Die parametrisierte Form einer Kurve überwindet die Probleme der expliziten und der impliziten Formen. Man stellt die gewünschte Kurve im  $\mathbb{R}^n$  durch  $n$  Funktionen  $x_i(u)$  dar.

Durch die Wahl des Wertebereiches des Parameters  $u$  können auch beliebige Kurvensegmente definiert werden.

Im Folgenden wird nur  $\mathbb{R}^2$  betrachtet und die Funktionen werden mit  $x(u)$  und  $y(u)$  bezeichnet. Es werden ausschließlich Polynome dritten Grades betrachtet, da höhergradige Polynome zur Oszillation neigen. Komplexere Kurven können durch stückweise aneinander gereihete Kurvensegmente dritten Grades approximiert werden. Dabei können an den Nahtstellen zwischen jeweils zwei Kurvensegmenten auch gleiche Steigungen und ggfs. auch gleiche Krümmungen erzwungen werden.

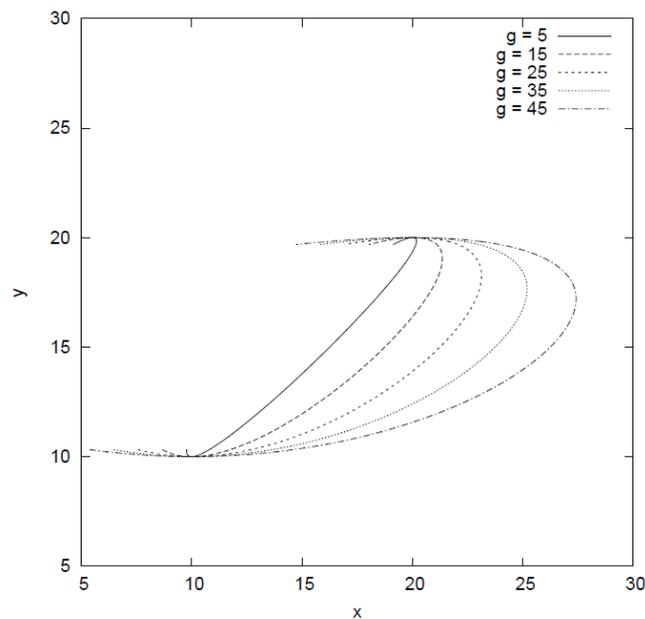
Gegeben sind zwei Punkte  $p_0$  und  $p_1$  in einem 2-dimensionalen Raum  $\mathbb{R}^2$  sowie die gewünschten Steigungen  $p_0$  und  $p_1$  einer noch zu bestimmenden Kurve in diesen Punkten. Es liegen für die  $x$ -Richtung und für die  $y$ -Richtung jeweils vier Bedingungen vor, wodurch ein Polynom dritten Grades eindeutig bestimmt ist.

Für jeden Punkt der Bahn kann der momentane Bahnradius  $R$  wie folgt berechnet werden:

$$R = \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}y}$$

Wichtig ist  $R$  am Startpunkt der geplanten Bahn, da  $R(u=0)$  den Bahnradius für die aktuelle Pose des Fahrzeuges beschreibt. Eine explizite Berechnung des Bahnradius scheidet wegen der Singularität bei Geradeausfahrt aus. Dieses kann durch eine explizite Zerlegung in einen rotatorischen und einen translatorischen Anteil vermieden werden.

Es bleibt das Problem der geeigneten Wahl der Stützstellen  $s_0$  und  $s_1$  bzw. der Länge der zugehörigen Tangenten  $d_0$  und  $d_1$  in der Start- und in der Zielpose (Abbildung 5-14).



**Abbildung 5-14: Mögliche Bahnkurven bei unterschiedlicher Wahl der Stützstellen**

Dieses Problem kann durch eine Optimierung gelöst werden. Zielfunktion könnte die Bahnlänge  $s$  oder die Fahrzeit  $t$  sein.

$$s = \int_0^1 \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \cdot du$$

Selbst die Minimierung der Bahnlänge ist nicht in analytisch geschlossener Form möglich, so dass ein numerisches Verfahren angewendet werden muss. Die Minimierung der Fahrzeit ist wesentlich komplexer und muss auch noch die Anfangs- und die Endgeschwindigkeit berücksichtigen. In diesem Projekt wurde ein iteratives Parametersuchverfahren implementiert, das mit Laufzeiten von mehr als 100 ms an der Grenze dessen liegt, was man in der Praxis einsetzen kann. Durch die Nutzung von Gradientenverfahren mit einer dynamischen Schrittweitensteuerung könnte man in einen Bereich gelangen, der auch komplexere Zielfunktionen erlaubt.

## 5.5 Bahnregelung

Grundsätzlich kann eine Bahn einmal geplant und dann abgefahren werden. Dieses Verfahren wird auch Tracking genannt. Die folgenden Abbildungen zeigen diesen Fall in der  $x/y$ -Ebene und eine dazu passende Reglerstruktur.

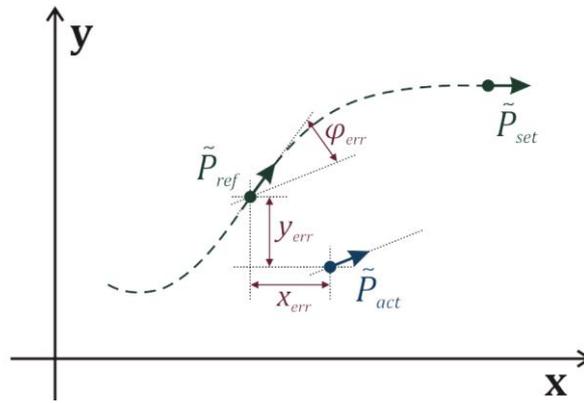


Abbildung 5-15: Abfahren einer zuvor geplanten Bahn

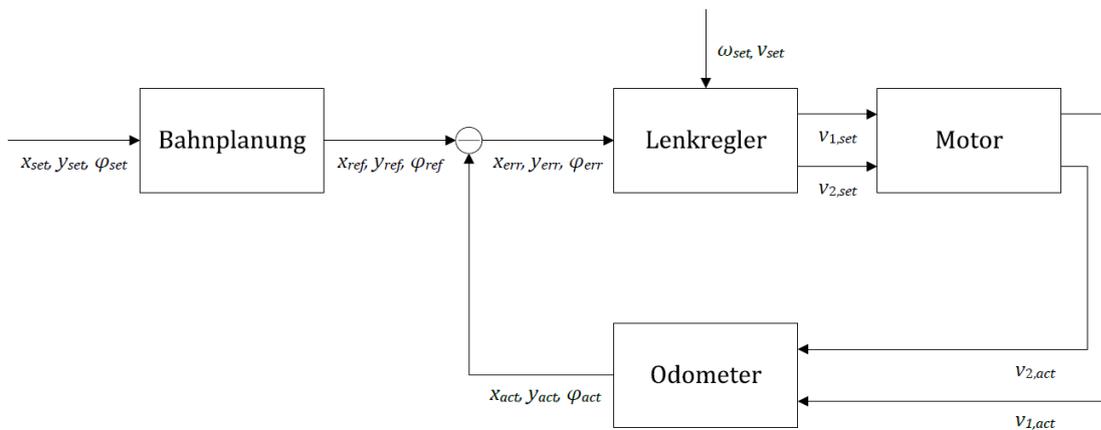


Abbildung 5-16: Bahnplanung mit anschließender Bahnregelung

Die Alternative legt die Bahnplanung in den Regelkreis und kann somit Fehler besser ausregeln als ein reines Tracking. Die folgenden Abbildungen zeigen diesen Fall in der x/y-Ebene und eine dazu passende Reglerstruktur:

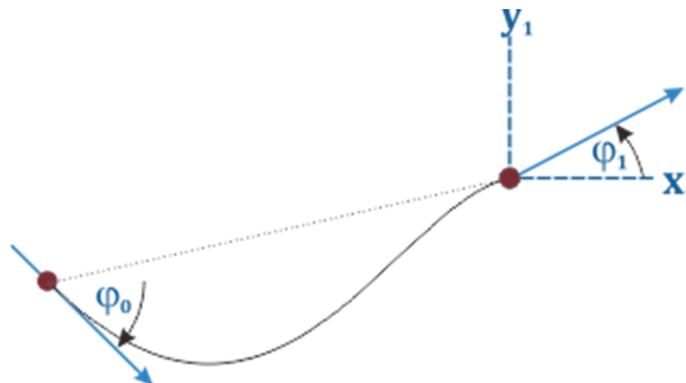


Abbildung 5-17: Geplante Bahnkurve

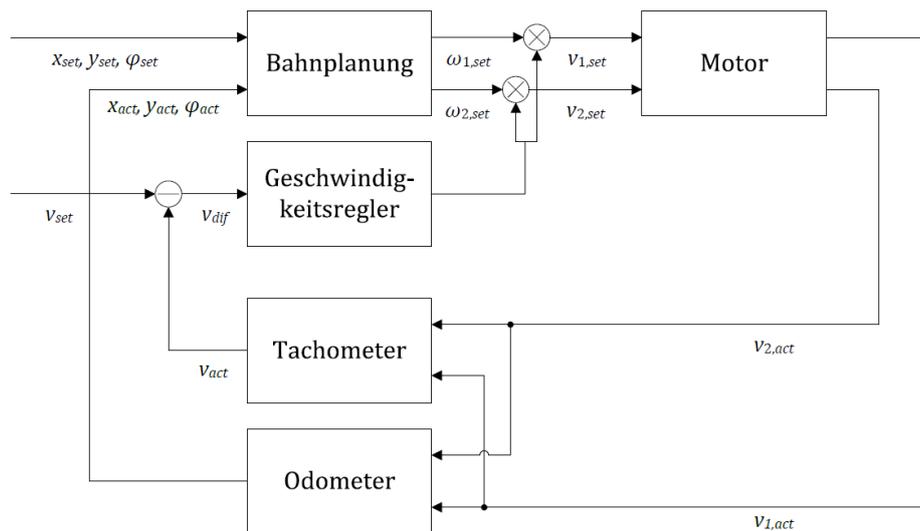


Abbildung 5-18: Bahnplanung im Regelkreis

## 5.6 Behandlung der Deadlockproblematik

Ein Deadlock liegt vor, wenn zwei Fahrzeuge darauf warten, dass das jeweils andere aus seiner eigenen Hüllkurve fährt. Derartige Verklemmungen können sich auch über mehr als zwei Fahrzeuge erstrecken. Diese Situationen können in einem „Resource Allocation Graphen“ dargestellt werden. Die Ressourcen sind die Flächen, die ein Fahrzeug zum Fahren benötigt. Diese können durch ein Fahrzeug belegt sein oder sie sind frei. Eine Mehrfachbelegung ist unzulässig und würde zu Kollisionen führen. Vor einer Zuteilung muss eine Fahrfläche durch ein Fahrzeug angefordert werden. Wenn eine angeforderte Fläche belegt ist, sie aber aktuell benötigt wird, muss das anfordernde Fahrzeug warten: Es ist „blockiert“. Solche Blockaden sind im Normalfall temporär und lösen sich wieder auf. Wenn aber in dem Resouce Allocation Graphen ein Zyklus über Flächenanforderungen und -zuteilungen vorliegt, können Blockaden nicht mehr auf gelöst werden: Ein Deadlock liegt vor.

Das einfachste Verfahren zur Vermeidung von Deadlocks beruht auf der Reservierung der gesamten Fahrstrecke vor Beginn der Auftragsbearbeitung durch ein Fahrzeug. Dieses Verfahren ist aber sehr restriktiv und reduziert den Durchsatz.

Eine andere Möglichkeit besteht in der Konzeption der Transportnetzes, so dass dieses strukturell Deadlocks vermeidet. Ein Beispiel hierzu sind Rundkurse, die auch geeignet gekoppelt werden können. An Deadlocks sind immer zwei oder mehr Fahr-

zeuge beteiligt. Ein „Festfahren“ eines Fahrzeuges in einer räumlichen Enge ist kein Deadlock.

### **5.7 Dispositionsverfahren**

Als Dispositionsverfahren hat sich das naive Verfahren „Nearest Vehicle First“ bewährt. Immer, wenn ein Fahrzeug einen Transportauftrag ausgeführt hat, bekommt es den Auftrag, dessen Quelle diesem Fahrzeug am nächsten ist.

Wenn in einem unterlasteten System, im dem mindestens ein Fahrzeug keinen Auftrag hat, eine neuer Transportauftrag eingelastet wird, wird für diesen Auftrag das Fahrzeug ausgewählt, das der Quelle dieses Auftrages am nächsten ist.

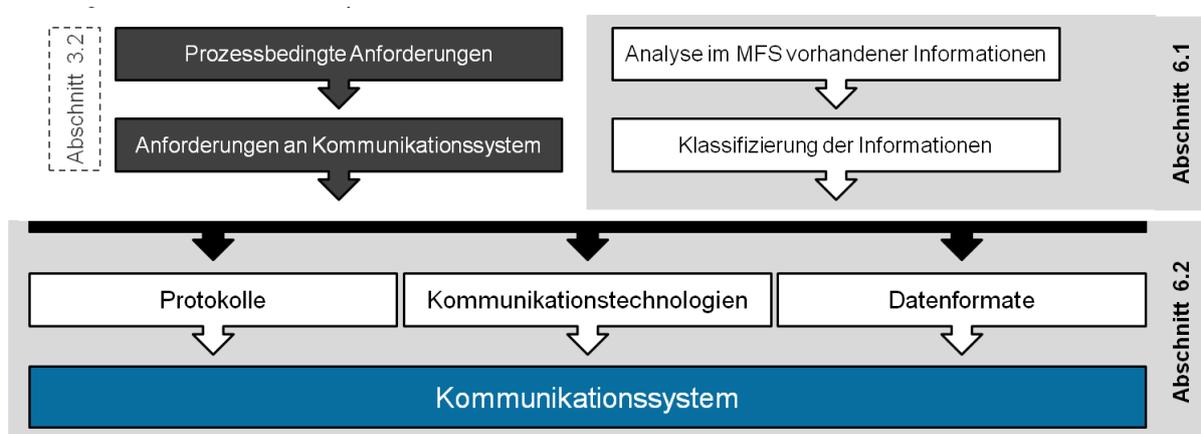
Um den Durchsatz zu steigern sind vorausschauende oder optimierende Dispositionsstrategien anzuwenden. Diese werden in der Praxis wenig eingesetzt und wurden auch im Rahmen dieses Projektes nicht weiter betrachtet. Ein Ziel ist die Minimierung der Leerfahrten, um den Durchsatz zu steigern.

Eine Alternative ist der Abbruch der so genannten „Holfahrten“, in denen ein Fahrzeug unbeladen zur Quelle fährt. Sollte sich während dieser Fahrt ein günstigerer Auftrag einstellen, wird der alte abgebrochen und dieser günstigere Auftrag bearbeitet.

## 6 Datenanalyse und Kommunikationsinfrastruktur

Eine weitere Herausforderung ist die Konzeptionierung eines offenen Kommunikationssystems, welches den Datenaustausch zwischen verteilten Steuerungseinheiten in einer heterogenen Umgebung unterstützt. Ein solches Konzept soll nach Möglichkeit aus etablierten Standards und Lösungen aufgebaut werden.

In diesem Abschnitt wird zunächst der für den Betrieb eines autonomen Fahrzeugkollektivs notwendige Informationsaustausch analysiert. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen der Entwicklung eines geeigneten Kommunikationssystems aus gängigen Technologien, Protokollen und Datenformaten (vgl. Abbildung 6-1).

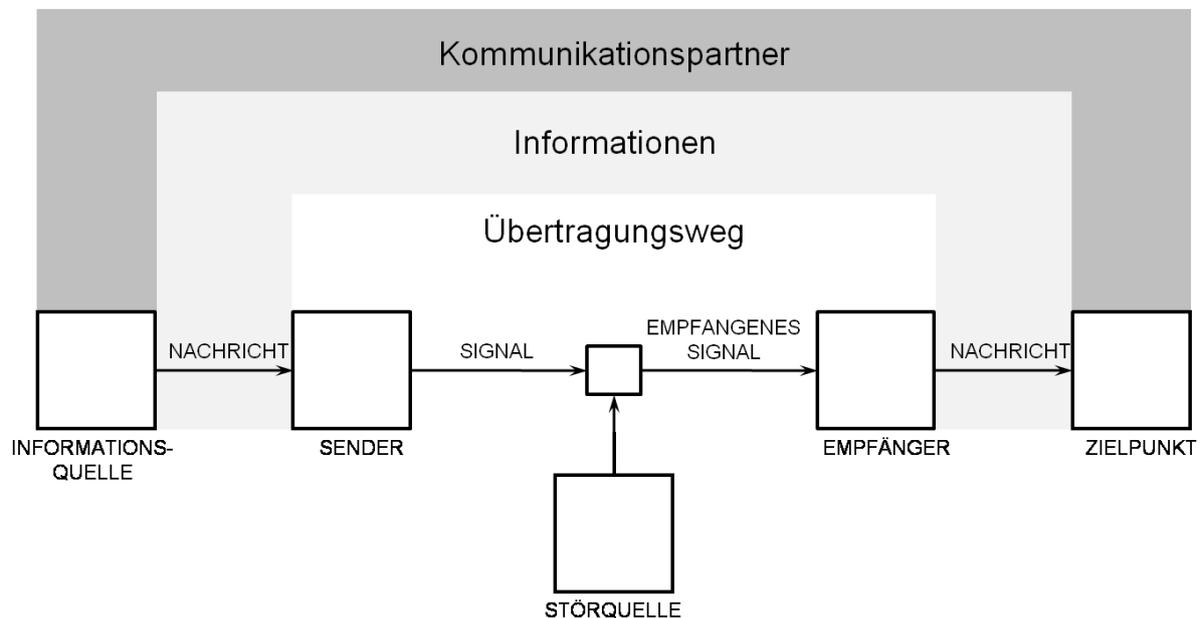


**Abbildung 6-1: Vorgehensweise bei der Gestaltung eines anforderungsgerechten Kommunikationssystems für die Zellulare Fördertechnik**

Für eine sinnvolle Datenverteilung innerhalb eines selbstgesteuerten Materialflusssystems sollen die vorhandenen Informationen zunächst analysiert und klassifiziert werden. Kriterien für die Klassifizierung sind beispielsweise Datenmenge, Echtzeitanforderungen oder die Anzahl der Empfänger einer Nachricht. Mittels eines Entscheidungsbaums werden relevante Informationen nach den definierten Kriterien verschiedenen Kategorien zugeordnet. Diese bilden die Grundlage für die weitere Entwicklung der Kommunikationsinfrastruktur.

Anhand des in Abbildung 6-2 dargestellten Kommunikationsmodells nach Shannon und Weaver [Sha-1949] sollen Funktionen und Bestandteile eines Kommunikationssystems einleitend kurz vorgestellt werden. Das Modell unterstützt ein strukturiertes Vorgehen bei der Gestaltung des Kommunikationssystems für die Zellulare Förder-

technik, indem es zwischen Kommunikationspartnern, Informationen und Übertragungswegen unterscheidet.



**Abbildung 6-2: Schematische Darstellung eines allgemeinen Kommunikationssystems (in Anlehnung an [Sha-1949, S. 5])**

Als Kommunikationspartner sind in einem Zellularen Transportsystem Fahrzeuge und periphere Einrichtungen (z.B. Leitsteuerung, Lastübergabestationen) gegeben. Diese Kommunikationsteilnehmer repräsentieren gleichzeitig die Quellen und Senken für den Nachrichtenaustausch im System. Welche Informationen zwischen ihnen ausgetauscht werden müssen, um einen reibungslosen Materialfluss zu gewährleisten, wird in Abschnitt 6.1 untersucht. Wie diese Informationen den oder die richtigen Empfänger erreichen, ist Gegenstand von Abschnitt 6.2. Die Art des Übertragungssignals und mögliche Störquellen bei der Datenübertragung hängen von der verwendeten Kommunikationstechnologie ab. Regeln für den Verbindungsaufbau und den Kommunikationsablauf legen entsprechende Protokolle fest (vgl. Abschnitt 2.3). Und eine Festlegung einheitlicher Datenformate sorgt dafür, dass alle Teilnehmer die gleiche „Sprache“ sprechen, d.h. empfangene Signale auch korrekt interpretieren können.

Entscheidende Faktoren für die Güte des Kommunikationssystems sind die Geschwindigkeit, mit der die Informationen zwischen Informationsquelle und Zielpunkt übermittelt werden können, und das Maß an Zuverlässigkeit, mit der die gesendeten Nachrichten fehlerfrei den Empfänger erreichen.

## 6.1 Datenanalyse im Materialflusssystem

Ein erster Überblick über die verschiedenen Informationsarten in Materialflusssystemen kann aus zwei bereits im Stand der Technik und Forschung (Abschnitt 2) vorgestellten Richtlinien gewonnen werden. So unterscheidet die VDI-Richtlinie 2510 exemplarisch folgende in einem Fahrerlosen Transportsystem (FTS) auszutauschende Daten:

**Tabelle 6-1: Informationen der FTS-Steuerung [VDI2510]**

Fahrauftrag	Fertigmeldung
Hol-, Bringziele	Batteriezustand
Steuersignale zur Blockstreckensteuerung	auftragsspezifische Daten (Fertigungsdurchlauf, Historie)
Steuersignale zur Synchronisation FTF-seitiger Lastaufnahmemittel und stationärer Lastübergabestationen	produktspezifische Daten (Auftragsnummer, Farbcode etc.)
Fahrzeugnummer	Stör- und Fehlermeldungen
Fahrzeugposition	sicherheitsrelevante Steuersignale
Fahrzeugstatus (Beladezustand, Not-Stop etc.)	Steuersignale zu sonstigen peripheren Einrichtungen (Tore, Schranken etc.)

Auch im VDI/VDMA-Richtlinienentwurf 5100 „Softwarearchitektur für die Intralogistik (SAIL)“ erfolgt eine Auflistung verschiedener Informationen:

**Tabelle 6-2: Informationen nach [VDI/VDMA5100]**

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)	

Wenn die Systemsteuerung über ein Multiagentensystem (vgl. Abschnitt 2.2.3) erfolgt, entsteht weiterer Kommunikationsbedarf beispielsweise im Rahmen einer dezentralen Auftragsdisposition oder durch zusätzlichen Organisations- und Koordinationsaufwand bei der Systemkonfiguration (vgl. Tabelle 6-3).

**Tabelle 6-3: Zusätzlicher Datenaustausch in dezentral gesteuerten Materialflusssystemen**

Auftragsverhandlungen	Meldungen über Gebote/Kosten
An-/Abmeldung im System	Einrichten/Kündigen von Abonnements

In einem ersten Schritt werden aus den unterschiedlichen in einem Materialflusssystem vorhandenen Informationen die für eine Zellulare Fördertechnik relevanten Datenarten extrahiert. Dabei variiert der Informationsbedarf der Fahrzeuge und anderer Systemteilnehmer für verschiedene Konzepte der Steuerungsorganisation (vgl. Abbildung 2-11). Auch dieser Aspekt wird bei der Datenanalyse berücksichtigt.

### 6.1.1 Informationsarten im Materialflusssystem

Die folgende Übersicht (Tabelle 6-4) clustert Informationen hinsichtlich ihrer Verwendung im Materialflusssystem. Es handelt sich dabei um Informationsarten, die auch für ein Zellulares Transportsystem relevant sind.

**Tabelle 6-4: Informationsarten in Zellularen Transportsystemen**

Symbol	Informationsart	Eigenschaften
	Visualisierungsdaten	Positionen, Statusmeldungen, Layout
	Topologie / Layout	Aggregierte Funktion, sammelt und verteilt Positionsdaten
	Organisation / Koordination	An-/Abmeldung im System, Einrichten/Kündigen von Abonnements <sup>12</sup>
	Auftragsverhandlungen	Gebote/Kosten und Rückmeldungen

<sup>12</sup> Der Informationsaustausch mittels Abonnements wird in Abschnitt 7.2 näher erläutert.

	Transportauftragsdaten	Datenkollektiv, das einen Auftrag beschreibt, Quittierung, Storno
	Fahrauftragsdaten	Aktuelle Position, Koordinaten von Stützpunkten, nächstes Ziel, Storno
	Reservierungen	Strecken, Positionen, Zonen, Aufträge
	Kollisionsvermeidung	Aggregierte Funktion, sammelt Daten
	Identifikationsdaten	Von Barcode oder RFID-Tag ausgelesene Daten, Daten schreiben (RFID)
	Sensordaten	Distanzwerte, Geschwindigkeit, Gewicht etc.
	Lastwechselkoordination	Datenaustausch zwischen Lastübergabestation und Fahrzeug
	Status-/Fehlermeldungen	Frei, Beschäftigt, Fehler, Fehlerart, Notaus-Signal
	Schaltaufträge	Schaltaufträge als Eingang für SPS

Manche der aufgeführten Informationsarten können als Teilmenge anderer Informationsarten auftreten. So kann ein Transportauftrag aus einzelnen Fahraufträgen aufgebaut sein oder die Kollisionsvermeidung auf Sensor- und Layoutdaten zurückgreifen. Tabelle 6-4 enthält keine Aussage über die Zielpunkte der einzelnen Informationen, d.h. an welchem Ort des Gesamtsystems sie verarbeitet werden. So erfolgt die Lastwechselkoordination bei hierarchisch aufgebautem Steuerungssystem auf einem Leitrechner, der zunächst überprüft, ob sich die beteiligten Fördertechnikelemente in einem sicheren Zustand befinden und anschließend die entsprechenden Schaltbefehle sendet. Soll sich die Fördertechnik selbst steuern (wie im „Internet der Dinge“, vgl. Abschnitt 2.2.3), so muss die Koordination von Lastwechseln dezentral durch einen Nachrichtenaustausch zwischen den beteiligten Fördertechnikmodulen realisiert werden. Dieses Beispiel macht deutlich, dass sowohl Menge als auch Art der

innerhalb des Systems transferierten Daten in Abhängigkeit von der Steuerungsorganisation variiert.

### 6.1.2 Klassifizierung relevanter Informationen

Aufgrund der Informationsvielfalt in einem Zellularen Transportsystem und der teils sehr unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Informationsarten kann es sinnvoll sein, für unterschiedliche Daten unterschiedliche Übertragungswege vorzusehen. Um festzustellen, ob ein einziges Kommunikationssystem den gesamten Datenaustausch bereits mit ausreichender Effizienz ermöglichen kann oder ob mehrere, spezialisierte Kommunikationssysteme benötigt werden, sollen die relevanten Informationen hinsichtlich der Kriterien

- maximale Datenmenge,
- Zeitvorgaben,
- durchschnittliche Bedarfshäufigkeit und
- Anzahl der Nachrichtenempfänger/-sender (Endpunkte<sup>13</sup>)

klassifiziert werden. Diese Klassifizierungskriterien legen gleichzeitig die Rahmenbedingungen zur Erfüllung der in Abschnitt 3.2.2 formulierten Forderung nach einer bedarfsgerechten Bereitsstellung benötigter Daten fest ( $\rightarrow$  Anforderung A1<sub>K</sub>). Die Ausprägungen der Kriterien lassen sich lediglich vergleichend angeben, was aber für den Zweck einer groben Klassifizierung zur Ableitung weiterer Handlungsschritte durchaus zielführend ist.

So wird bei der maximalen Datenmenge lediglich zwischen *gering* (wenige Bit) und *hoch* (mehrere Byte), bei der durchschnittlichen Bedarfshäufigkeit zwischen *selten* (einmal pro Stunde) und *oft* (mehrmals pro Sekunde) sowie bei der Anzahl der Endpunkte zwischen *wenigen* (ein bis zwei Sender und/oder Empfänger) und *vielen* (mehr als zwei Sender und/oder Empfänger) unterschieden. Die verschiedenen Ausprägungen des Kriteriums „Anzahl der Endpunkte“ veranschaulicht Abbildung 6-3. Das Kriterium „Zeitkritisch“ gibt an, ob bei Nichteinhalten einer bestimmten Zeitvorgabe (50 ms, 10 min) für die Übermittlung der Information ein Sicherheitsrisiko besteht (vgl. Abschnitt 3.2.2,  $\rightarrow$  Anforderung A5<sub>K</sub> – Kommunikation in Echtzeit).

---

<sup>13</sup> Sender (Informationsquelle) und Empfänger (Zielpunkt) stellen die Endpunkte des Informationsaustausches dar und werden im Folgenden zusammengefasst betrachtet.

Zwischen den vier Kriterien lässt sich eine Gewichtung vornehmen: Hauptkriterien stellen die maximal zu übertragene *Datenmenge* sowie das Vorhandensein strikter *Zeitvorgaben* dar, während die *Bedarfshäufigkeit* und die *Anzahl der Endpunkte* als Zusatzkriterien für eine detailliertere Klassifizierung gesehen werden können, die jedoch geringeren Einfluss auf die Ausgestaltung der Kommunikationssysteme haben.

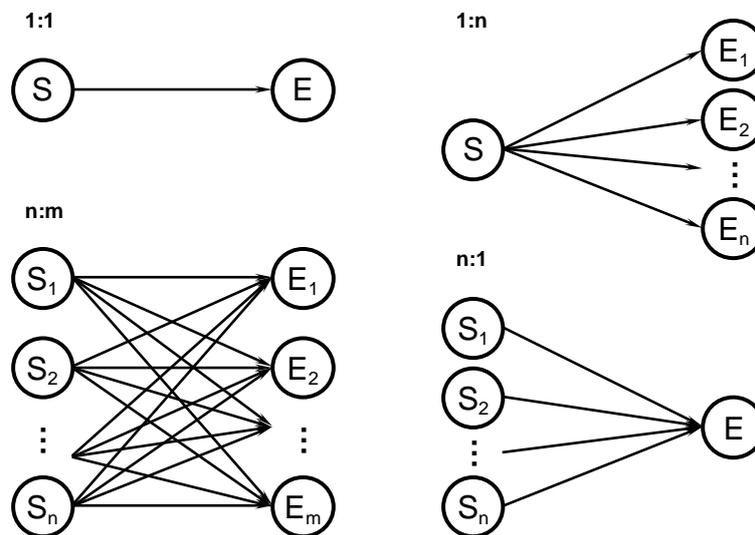


Abbildung 6-3: Kriterium "Anzahl der Endpunkte" (S: Sender, E: Empfänger)

So kann im Fall einer einzelnen, häufig anfallenden Nachricht mit vielen Empfängern und/oder Sendern (z.B. Reservierungen, Transportaufträge) der Einsatz von Informationsknotenpunkten (Blackboards), wie sie in Abschnitt 0 vorgestellt werden, den Datenaustausch effizienter gestalten als eine direkte Kommunikation zwischen dem Sender und sämtlichen Empfängern (Peer-to-Peer-Kommunikation). Tabelle 6-5 fasst die Klassifizierungskriterien und ihre möglichen Ausprägungen zusammen.

Tabelle 6-5: Kriterien zur Nachrichtenklassifizierung

Kriterium	Ausprägung	
Zeitkritisch	nein	ja
Max. Datenmenge	hoch	gering
Häufigkeit	selten	oft
Anzahl Endpunkte	wenige	viele

Mittels eines Entscheidungsbaums lassen sich die Nachrichten nach den definierten Kriterien sortieren (Abbildung 6-4). Durch die vollständige Kombination aller Ausprägungen ergeben sich rechnerisch  $2^4 (=16)$  Klassen, wobei nicht alle Kombinationen durch die Informationsarten abgedeckt werden. Zudem ist nicht jede vorhandene

## 6 Datenanalyse und Kommunikationsinfrastruktur

Datenklasse gleichbedeutend mit der Notwendigkeit eines separaten Kommunikationssystems für die exklusive Übertragung der eingruppierten Informationen. Vielmehr lassen sich einige der Klassen zu „Anforderungsfamilien“ zusammenführen, deren Informationen über einen gemeinsamen Übertragungsweg gesendet werden können.

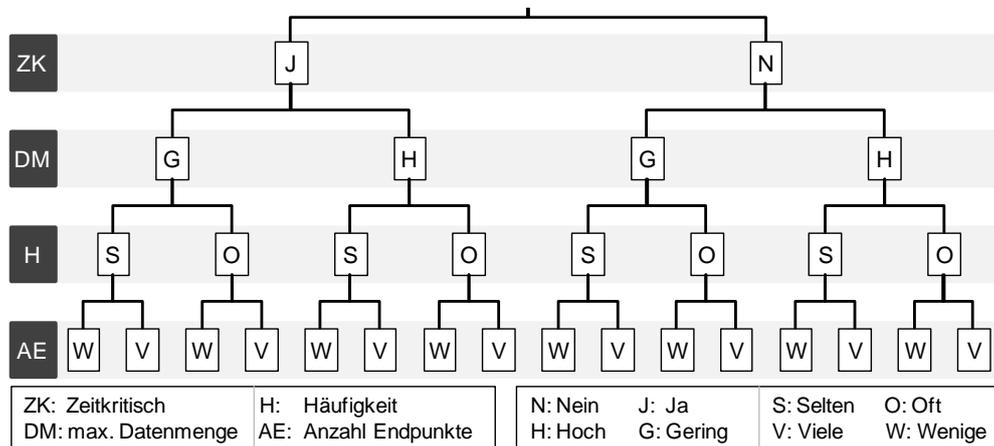


Abbildung 6-4: Entscheidungsbaum zur strukturierten Klassifizierung von Informationen

Abbildung 6-5 zeigt exemplarisch die Klassifikation der Informationen „Transportauftrag“ und „Notaus-Signal“.

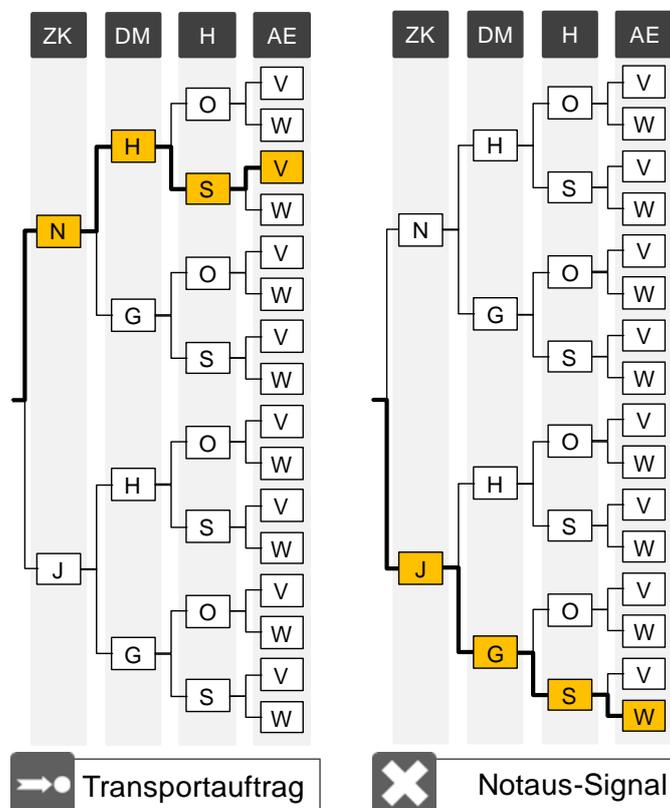
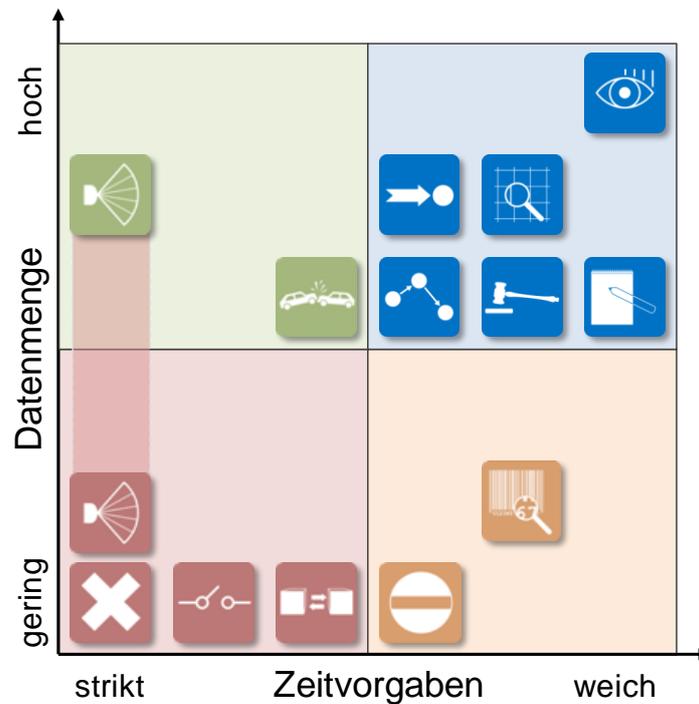


Abbildung 6-5: Beispielhafte Klassifizierung zweier unterschiedlicher Informationsarten

Es bleibt festzuhalten, dass das Ergebnis der Klassifizierung vom Anwendungsfall und den dort vorherrschenden Gegebenheiten abhängt. So können Datenmenge, Bedarfshäufigkeit oder die Anzahl der Endpunkte in verschiedenen Szenarien für dieselbe Informationsart stark variieren. Abbildung 6-6 zeigt eine Einteilung der Informationsarten nach den beiden Hauptkriterien Datenmenge und Zeitvorgaben.



**Abbildung 6-6: Qualitative Einordnung der Informationsarten nach den Kriterien Datenmenge und Zeitvorgaben**

Aus der Grafik lässt sich eine Häufung von Informationen mit geringer Datenmenge aber strikten Zeitvorgaben (Status-/Fehlermeldungen, Lastwechselkoordination, Schaltaufträge, einfache Sensordaten) sowie von Informationen mit hoher Datenmenge aber weichen Zeitvorgaben (Transportauftragsdaten, Fahrauftragsdaten, Auftragsverhandlungen, Topologie-/Layoutdaten, Organisations-/Koordinationsdaten, Visualisierungsdaten) ablesen. Diese Erkenntnis stellt den Ausgangspunkt für die Gestaltung des Kommunikationssystems dar.

## 6.2 Kommunikationsinfrastruktur

Aufbauend auf der im vorangegangenen Abschnitt durchgeführten Datenklassifizierung gilt es in einem nächsten Schritt, geeignete Kommunikationstechnologien, Protokolle sowie Datenformate für die unterschiedlichen Informationsklassen auszuwäh-

len. Die angestrebten Kommunikationssysteme müssen dabei weiterhin die in Abschnitt 3.2.2 formulierten Anforderungen erfüllen:

- **A1<sub>K</sub>** – Bedarfsgerechte Bereitsstellung benötigter Daten
- **A2<sub>K</sub>** – Vollständige Mobilität für Sender/Empfänger
- **A3<sub>K</sub>** – Einsatz in industriellem Umfeld
- **A4<sub>K</sub>** – Wirtschaftlichkeit, Anbieterunabhängigkeit
- **A5<sub>K</sub>** – Kommunikation in Echtzeit
- **A6<sub>K</sub>** – Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit
- **A7<sub>K</sub>** – Datensicherheit/Security
- **A8<sub>K</sub>** – Energieversorgung

Aufgrund des komplexen Anforderungsprofils erfolgt zunächst eine Analyse und Bewertung bestehender Standards der Kommunikationstechnik sowie etablierter Datenformate hinsichtlich ihrer Eignung für den Datenaustausch in einem Fahrzeugswarm. Auf diese Weise soll ein offenes, einfach nutzbares Konzept erreicht werden, das nicht auf Speziallösungen basiert. Dass manche der geforderten Eigenschaften wie Datensicherheit oder Zuverlässigkeit in einigen der Standards bereits adressiert sind, ist ein weiteres Argument für deren Einsatz in den Kommunikationssystemen einer Zellularen Fördertechnik.

Die Bedeutung, die dem Kommunikationssystem beim Betrieb einer technischen Anlage zukommt, soll folgender Auszug aus der VDI-Richtlinie 2510 nochmals verdeutlichen, der sich auf die Kommunikation in einem Fahrerlosen Transportsystem (FTS) bezieht: „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. Die tatsächliche Leistungsfähigkeit eines Datenübertragungssystems, das heißt seine Reaktionsgeschwindigkeit und Übertragungsdauer, ist abhängig von

- Übertragungsgeschwindigkeit
- Zuverlässigkeit des Verfahrens
- Prozedur und Protokoll der Datenübertragung“ [VDI2510]

Die genannten Einflussfaktoren Geschwindigkeit, Zuverlässigkeit und eingesetzte Protokolle sind auch Grundlage der Betrachtungen in den nächsten Abschnitten.

### 6.2.1 Kommunikationstechnologien und -protokolle

Unter Berücksichtigung der *Anforderung A1<sub>K</sub> – Vollständige Mobilität für Sender/Empfänger* erfolgt bei der Suche nach geeigneten Kommunikationstechnologien eine Fokussierung auf drahtlose Kommunikationstechnologien. Dennoch werden auch Lösungen der industriellen Kommunikation wie Feldbussysteme und Industrial Ethernet untersucht, die üblicherweise leitungsgebunden ausgeführt sind. Vor allem bzgl. Lösungen für *Anforderung A5<sub>K</sub> – Kommunikation in Echtzeit* können gängige Bussysteme und ihre Protokolle interessanten Input liefern. Zu den betrachteten Eigenschaften der verschiedenen Kommunikationstechnologien gehören u.a. Datenübertragungsraten, Latenzzeiten sowie auch qualitative Faktoren wie die Zuverlässigkeit in einem industriellen Umfeld bei sich bewegenden Kommunikationspartnern.

Es existieren mehrere Unterscheidungsmerkmale für Netzwerkprotokolle. So sind Netzwerkprotokolle entweder nachrichten- oder teilnehmerorientiert (vgl. Abbildung 6-7). Die erste Protokollart stellt eine verbindungslose Kommunikationsform dar, während bei der zweiten Protokollart der Datenaustausch auf Basis von Teilnehmeradressen erfolgt. Darüber hinaus lassen sich Busprotokolle nach dem verwendeten Buszugriffsverfahren unterscheiden. Bei nachrichtenorientierten Protokollen erfolgt der Buszugriff unkontrolliert und daher zufällig (nicht deterministisch), während teilnehmerorientierte Protokolle mit einem kontrollierten und dadurch deterministischen Buszugriff arbeiten.

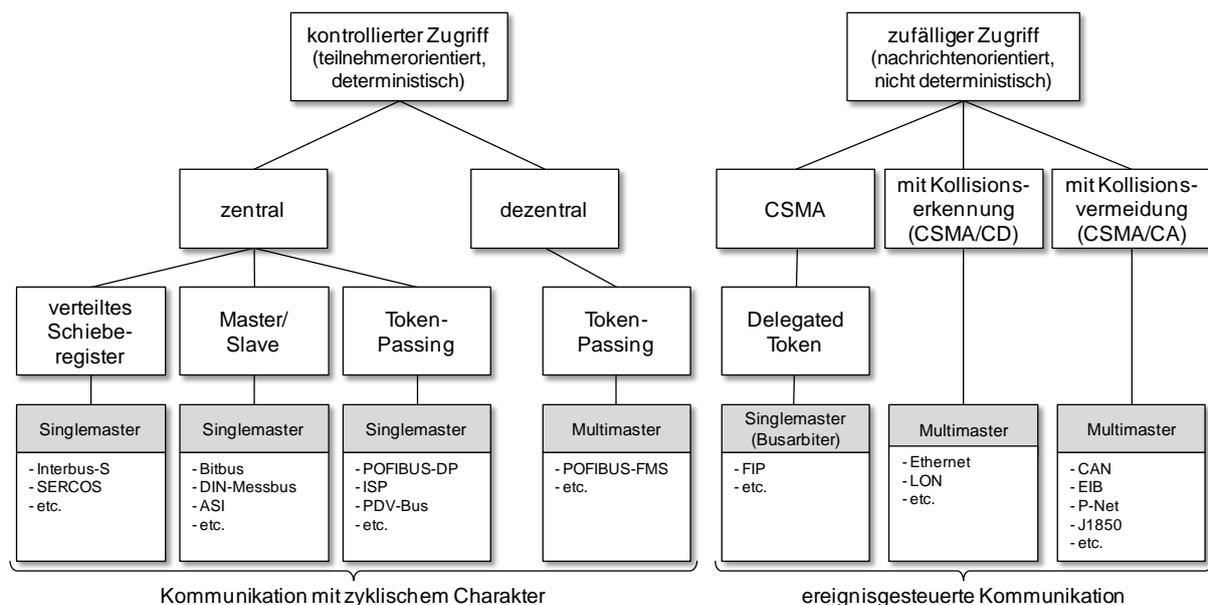


Abbildung 6-7: Klassifikation von Bussystemen (in Anlehnung an [Nde-1999, Sch-2006])

Bei teilnehmerorientierten Zugriffsverfahren kann die Vergabe des Buszugriffsrechtes durch eine zentrale Instanz (Master) oder dezentral durch Absprache zwischen den Teilnehmern erfolgen (z.B. durch Token-Passing). Bei nachrichtenorientierten Protokollen kann jeder Teilnehmer auf den Bus zugreifen, sobald dieser frei ist. Kollisionen während der Datenübertragung sind somit verfahrensimmanent. Das Vorgehen zur Auflösung dieser Kollisionen ist ein weiteres Klassifizierungsmerkmal für Bussysteme mit nachrichtenorientiertem Protokoll. [Mül-2000]

In einer ersten Variante fordert ein sogenannter Bus-Arbitr<sup>14</sup> einen Busteilnehmer über ein spezifisches Telegramm (Delegated Token) zum Senden einer Nachricht auf. Das Telegramm gibt durch die Übertragung einer Nachrichtenennung an, welche konkrete Nachricht gesendet werden soll. Diese Nachricht kann dann von allen interessierten Teilnehmern empfangen werden. Eine andere Protokollvariante kann Kollisionen erkennen (Collision Detection, CD) und durch teilnehmerspezifische, zufällig gewählte Wartezeiten Zeitpunkte eines erneuten Buszugriffs ermitteln und berücksichtigen. Die dritte Möglichkeit besteht darin, Kollisionen von vornherein durch eine Priorisierung von Nachrichten zu vermeiden (Collision Avoidance, CA). Bei diesem Verfahren zieht sich der Teilnehmer mit der niedrigeren Priorität zurück, falls er gleichzeitig mit einem höher priorisierten Teilnehmer mit der Sendung begonnen hat. Die beiden letztgenannten Methoden (Collision Detection, Collision Avoidance) finden auch bei der drahtlosen Kommunikation per Funk Anwendung. [Mül-2000]

In Hinblick auf eine möglichst dezentrale und skalierbare Steuerung für Zellulare Transportsysteme sollen sowohl die Fahrzeuge als auch periphere Einrichtungen in der Lage sein, ihre Daten (z.B. Zustandsdaten, Aufträge, Reservierungen) jederzeit und unaufgefordert zu melden. Netzwerkprotokolle mit kontrolliertem Buszugriff genügen dieser Anforderung nicht, da sie eine zyklische Kommunikation festlegen und werden daher nicht weiter betrachtet. Protokolle mit zufälligen Buszugriffen können hingegen prinzipiell für eine ereignisgesteuerte Kommunikation eingesetzt werden. Die Suche nach einem geeigneten Protokoll fokussiert zudem eine gleichberechtigte Kommunikation aller Teilnehmer nach dem Peer-to-Peer-Prinzip und schließt somit auch Singlemaster-Lösungen aus. Da mit Protokollen, die das CSMA/CD-Verfahren zur Kollisionauflösung verwenden, nicht die nötige Zuverlässigkeit bei der Übertra-

---

<sup>14</sup> Zentrale Komponente zur Steuerung des Buszugriffs

gung von Daten erreicht werden kann, erscheinen Netzwerkprotokolle mit Kollisionsvermeidung (CSMA/CA) besser für den Anwendungsfall geeignet.

Im Folgenden werden zunächst exemplarisch die Kommunikationssysteme PROFIBUS, CAN-Bus und Industrial Ethernet vorgestellt, ehe der Fokus wie oben angesprochen auf drahtlose Kommunikationstechnologien und die entsprechenden Protokolle gelegt wird.

### **Feldbusse**

#### PROFIBUS

PROFIBUS (Process Field Bus) ist ein offenes, herstellerübergreifendes Feldbussystem für die Automatisierungstechnik. PROFIBUS ist nach IEC 61158 international standardisiert. Es existieren drei PROFIBUS-Varianten:

- PROFIBUS DP (Dezentrale Peripherie, meistgenutzte Variante):  
Ansteuerung von Sensoren und Aktoren durch eine zentrale Steuerung oder Verbindung von „verteilter Intelligenz“ (Vernetzung mehrerer Steuerungen untereinander).  
Datenraten von bis zu 12 Mbit/s.
- PROFIBUS PA (Prozess-Automation):  
Kontrolle von Messgeräten durch Prozessleitsystem in der Prozess- und Verfahrenstechnik. Eignung für explosionsgefährdete Bereiche (Ex-Zonen 0, 1).  
Datenrate von 31,25 kbit/s.
- PROFIBUS FMS (Fieldbus Message Specification):  
Einsatz in komplexen Maschinen und Anlagen. Abgelöst durch Protokollvariante DP.

Mit seinen Protokollvarianten DP und PA ist PROFIBUS der einzige Feldbus, der in der Fertigungsautomatisierung und in der Prozessautomatisierung gleichermaßen eingesetzt werden kann. PROFIBUS DP ist übertragbar auf WLAN nach IEEE 802.11 [Wil-2006, PFT-2000]. Dies führt allerdings zu Einbußen bei der erreichbaren Datenrate. Aus oben genannten Gründen (Protokoll mit kontrolliertem Zugriff, Kommunikation mit zyklischem Charakter) stellt der PROFIBUS-Standard keine geeignete Lösung für das zu gestaltende Kommunikationssystem dar.

### CAN-Bus

Der CAN-Bus (Controller Area Network) ist ein asynchrones<sup>15</sup>, serielles Feldbussystem. Der CAN-Bus wurde ursprünglich für die Vernetzung von Steuergeräten in Automobilen entwickelt [Law-2009]. CAN ist nach ISO 11898 international standardisiert und definiert die physikalische Schicht (Physical Layer) und Datenschicht (Data Link Layer) im ISO/OSI-Referenzmodell. Der CAN-Bus bietet hohe Übertragungsraten über kurze Entfernungen und findet daher auch in industriellen Bereichen Anwendung, wo abgeschlossene Systeme eine effiziente Infrastruktur zum Datenaustausch benötigen. In der CAN-Bus-Architektur kann jeder Teilnehmer als Master fungieren. Auf diese Weise wird eine hohe Systemverfügbarkeit und eine Unabhängigkeit der Teilnehmer erreicht. Weiterhin wird die Übertragung hochpriorer Nachrichten auch im Konfliktfall garantiert. Das CAN-Bus-Protokoll ist ein offenes Protokoll mit hohem Standardisierungsgrad (CANopen, Nutzerorganisation CiA). Dank der weiten Verbreitung in der Automobilindustrie sind die erforderlichen Komponenten preisgünstig erhältlich. Das CAN-Bus-Protokoll lässt sich auf die Funkstandards DECT, DPRS und Bluetooth übertragen [Wil-2006, PFT-2000]. Durch die Verwendung des CSMA/CA-Verfahrens weist das CAN-Protokoll eine hohe Zuverlässigkeit auf und kann das Versenden wichtiger Nachrichten innerhalb einer berechenbaren Zeitspanne gewährleisten [Law-2009].

Eine detaillierte Übersicht über die technischen Grundlagen und mögliche Umsetzungen der vorgestellten sowie weiterer Feldbussysteme bietet [Sch-2006].

### **Industrial Ethernet**

Die Bezeichnung „Industrial Ethernet“ fasst sämtliche Bestrebungen zusammen, den Ethernet-Standard (IEEE 802.3) für den Datenaustausch in industriellen Fertigungsanlagen nutzbar zu machen. Ethernet spezifiziert wie das CAN-Protokoll die Schichten 1 und 2 des ISO/OSI-Referenzmodells. Somit fungiert Industrial Ethernet als Sammelbegriff für Kommunikationssysteme in der industriellen Automatisierungstechnik, die auf den unteren Schichten Ethernet einsetzen. Um den Ethernet-Standard auch als Feldbusprotokoll verwenden zu können, sind v.a. Weiterentwicklungen hin-

---

<sup>15</sup> Synchrone Datenübertragung: Kommunikation über Taktsignal synchronisiert; sonst asynchrone Datenübertragung

sichtlich der Echtzeitfähigkeit notwendig. Ethernet nutzt das Buszugriffsverfahren CSMA/CD und kann daher das rechtzeitige Eintreffen zeitkritischer Nachrichten nicht garantieren. Ethernet Powerlink, EtherCAT und PROFINet sind Beispiele für Protokollerweiterungen des Ethernet-Standards, die harte Echtzeitfähigkeit und somit einen industriellen Einsatz ermöglichen. Ethernet unterstützt neben leitungsgebundenen Übertragungstechniken wie Kupferdraht oder Lichtwellenleiter auch Funkübertragungstechniken wie WLAN [Wil-2006, PFT-2000].

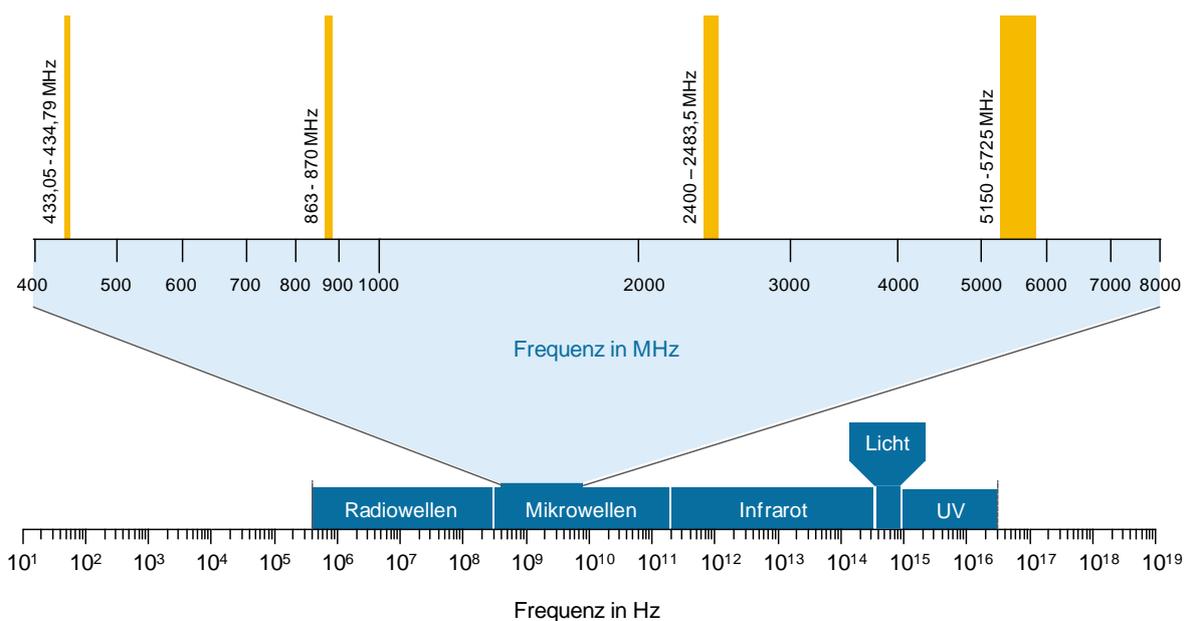
### **Drahtlose Kommunikationstechnologien**

Roth definiert die drahtlose Kommunikation wie folgt (in Anlehnung an [Rot-2005], zitiert aus [Krc-2010, S. 675]):

*„Drahtlose Kommunikation ist eine Form der elektronischen Kommunikation, bei der die Übertragung von Daten oder auch Sprache entweder durch ein Funknetz auf Basis elektromagnetischer Wellen oder durch den Austausch von Lichtwellen ermöglicht wird.“*

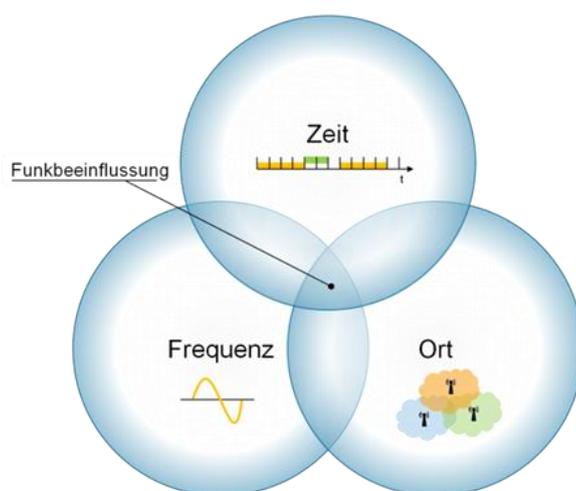
Bei Systemen für die drahtlose Datenübertragung unterscheidet man demnach zwischen optischen Übertragungsverfahren wie Infrarot oder Laser und funkbasierten Verfahren. Optische Verfahren stellen aufgrund der erforderlichen direkten Sichtverbindung zwischen den Teilnehmer eine starke Einschränkung hinsichtlich der Layoutflexibilität dar und werden daher im Weiteren nicht berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2.3.1). In diesem Abschnitt sollen vielmehr verschiedene Funkstandards untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung als Kommunikationstechnik für den Einsatz in Zellularen Transportsystemen bewertet werden.

Die weiter oben formulierte *Anforderung A4<sub>K</sub> – Wirtschaftlichkeit und Anbieterunabhängigkeit* legt die Nutzung einer lizenzfreien und nicht-proprietären Funklösung nahe. Daher sind Standards, die die Frequenzbereiche des sogenannten ISM-Bands (Industrial, Scientific and Medical Band, Abbildung 6-8) nutzen, von besonderem Interesse. Aufgrund der starken Nutzung dieser Frequenzbereiche kann allerdings eine gegenseitige Beeinflussung parallel betriebener Funkssysteme nicht ausgeschlossen werden.



**Abbildung 6-8: Lizenzfrei nutzbare Frequenzen im elektromagnetischen Spektrum [ZVEI-2008]**

Diese Funkbeeinflussung tritt dann auf, wenn zwei oder mehrere Systeme zur gleichen Zeit in gegenseitiger Funkreichweite auf derselben Frequenz senden (vgl. Abbildung 6-9). Die Folge sind Einbußen bei der Verfügbarkeit der einzelnen Systeme. In einem industriellen Umfeld, welches das gewählte Referenzszenario eines Distributionzentrums darstellt, ist dies nicht tolerierbar. Daher kann das Thema Funkplanung in diesem Zusammenhang von Bedeutung sein. Einen hilfreichen Leitfaden zu diesem Thema bietet der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) zum Download an [ZVEI-2008].



**Abbildung 6-9: Funkbeeinflussung beim Parallelbetrieb mehrerer Funknetze bei gleichzeitiger zeitlicher, räumlicher und frequenzmäßiger Überlappung**

Funkstandards unterscheiden sich hauptsächlich in ihrer Reichweite und ihrer maximalen Übertragungsrate (vgl. Tabelle 6-6). Da Zellulare Transportsysteme i.d.R. im Indoor-Bereich und räumlich begrenzt eingesetzt werden, sind für den drahtlosen Datenaustausch per Funk Reichweiten von 50 m als ausreichend anzusehen.

**Tabelle 6-6: Unterschiedliche drahtlose Kommunikationstechniken im Überblick (in Anlehnung an [Mat-2005], [Fin-2006], [Wil-2006] und [Krc-2010])**

Techniken		Frequenzbereich	Typische Reichweite	max. Datenübertragungsrate (brutto)
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	WiFi/ WLAN	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)	10 m (Klasse 2)	780 kbit/s
	Bluetooth 2.0			2,1 Mbit/s
	Bluetooth 3.0			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
	WirelessHART			250 kbit/s
	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

Neben den in Tabelle 6-6 aufgeführten Eigenschaften der verschiedenen Funkstandards sind noch folgende Kriterien für die Eignung der einzelnen Kommunikationstechniken für den vorliegenden Einsatzfall relevant:

- hohe Zuverlässigkeit
- geringes Risiko der Datenkollision
- schneller Verbindungsaufbau
- ausreichende Anzahl an parallelen Teilnehmern
- Energiebedarf

Daher werden die aufgelisteten Kommunikationstechniken im Folgenden kurz charakterisiert und einer Vorauswahl unterzogen. Für die Charakterisierung von Funkstandards sind Frequenzspreizverfahren sowie Multiplexverfahren von Bedeutung. Wichtige Spreizverfahren für den Frequenzbereich von 2,4 GHz bis 2,4835 GHz sind *FHSS* (Frequency Hopping Spread Spectrum) und *DSSS* (Direct Sequence Spread Spectrum). Beim *FHSS*-Verfahren wechselt der Sender die Trägerfrequenz in einem bestimmten Rhythmus, der dem Empfänger ebenfalls bekannt sein muss. Beim *DSSS*-Verfahren wird das Signal mit einem Spreizcode verknüpft. Je länger der Spreizcode ist, desto weiter wird das Signal im Frequenzspektrum gespreizt.

Multiplexverfahren dienen der Übertragung von Signalen mehrerer Sender über ein gemeinsames Medium (z.B. Kupferdraht, Luft) und existieren grundsätzlich in vier Ausprägungen (Raum-, Zeit-, Frequenz-, Codemultiplexing). Raummultiplexverfahren (*SDMA*, Space Division Multiple Access) ermöglichen das Übertragen von mehreren Nachrichten über parallele Übertragungswege, die den einzelnen Sendern und Empfängern jeweils exklusiv zur Verfügung stehen. Beim Zeitmultiplexverfahren *TDMA* (Time Division Multiple Access) werden in vordefinierten Zeitschlitzern die Daten verschiedener Sender auf einem Kanal übertragen. Beim Frequenzmultiplexverfahren *FDMA* (Frequency Division Multiple Access) wird zunächst jedes Signal auf eine eigene Trägerfrequenz moduliert. Die Signalbänder werden anschließend zusammengefasst. In den Empfängern werden die ankommenden Frequenzbänder wieder aufgeteilt und anschließend demoduliert. Eine Weiterentwicklung des *FDMA*-Verfahrens ist das *OFDM*-Verfahren (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), bei dem ein Signal auf mehrere Unterträger verteilt wird. Dies ermöglicht höhere Übertragungsraten durch eine erhöhte Störsicherheit. Eine weitere Multiplexingart ist das sogenannte Codemultiplexing (*CDMA*, Code Division Multiple Access). Dabei

überlagern sich die Signale im Frequenz- als auch im Zeitbereich, sind jedoch über unterschiedliche Spreizcodes voneinander unterscheidbar.

### RFID und NFC

Die Radio-Frequency-Identification-Technology (RFID) ermöglicht die automatische Identifizierung (AutoID) und Lokalisierung von Objekten und erleichtert damit die Datenerfassung. Die einem Objekt zugeordneten Daten befinden sich auf einem elektronischen Datenspeicher, dem sogenannten Transponder (oder auch RFID-Tag). Dieser Transponder besteht aus einem Chip und einer Antennenspule. Der Datenaustausch erfolgt über ein Lesegerät kontaktlos mit Hilfe elektromagnetischer Felder. Es gibt aktive und passive RFID-Transponder. Aktive Transponder können Daten mehr als hundert Meter weit übertragen, sind jedoch auf eine eigene Stromversorgung angewiesen. Passive Transponder beziehen den für den Lesevorgang benötigten Strom per elektromagnetischer Induktion vom RFID-Lesegerät und können daher deutlich kleiner ausgeführt werden als die aktive Variante. Das Auslesen und Beschreiben von passiven Transponder ist jedoch nur über eine kurze Distanz von wenigen Meter möglich. Die Near Field Communication (NFC) stellt eine Weiterentwicklung der RFID-Technologie dar und ermöglicht den kontaktlosen und schnellen Austausch von Daten zwischen mobilen Endgeräten (Mobiltelefon, Smartphone, PDA<sup>16</sup>). NFC-fähige Geräte können darüber hinaus auch NFC-Transponder lesen und beschreiben und unterstützen somit die automatische Datenerhebung beispielsweise in Logistikprozessen.

Durch die Spezialisierung der Technologien RFID und NFC auf das Einsatzfeld Identifikation (ggfs. ergänzt um eine Lokalisierungsfunktion) sind diese für die Kommunikation in einem Fahrzeugkollektiv ungeeignet. Von Interesse ist die RFID-Technologie jedoch in Bezug auf die automatische Identifikation von Ladungsträgern direkt am Lastaufnahmemittel der Fahrzeuge. Dem Internet-der-Dinge-Ansatz folgend können die Ladungsträger zudem mittels RFID-Transpondern zu „Smart Objects“ erweitert werden, die Zusatzdaten wie Gewicht, Zustand oder das nächste Zwischenziel mit sich führen und so eine dezentrale Materialflussteuerung unterstützen (vgl. Abschnitt 2.2.3) [Gün-2010a]. Durch diese prozessnahe, verteilte

---

<sup>16</sup> Personal Digital Assistant

Datenhaltung können die von der Fahrzeugsteuerung von übergeordneten Ebenen benötigten Informationen auf ein Mindestmaß reduziert werden.

### RFID und NFC

RFID und NFC sind für den Einsatz zur automatischen Identifikation optimiert und daher als Kommunikationstechnologie ungeeignet.



Schlussfolgerung: Nicht weiter verfolgt

### IEEE 802.11 (WiFi/WLAN)

IEEE 802.11 ist eine Normen-Familie für Wireless Local Area Networks (WLAN) bzw. Wireless Fidelity (WiFi). Das Protokoll spezifiziert die Kommunikation in Funknetzwerken mittlerer Reichweite und nutzt dafür das gebührenfreie ISM-Frequenzband 2,4 GHz und 5 GHz. IEEE 802.11 wird fortlaufend weiterentwickelt und in Hinsicht auf Datentransferraten, Sicherheit und Koexistenz mit anderen Systemen im ISM-Frequenzbereich (z.B. Bluetooth, Mikrowellen, andere WLANs etc.) in jeder Version verbessert. Der Medienzugriff erfolgt wie beim CAN-Bus nach dem CSMA/CA-Verfahren. Im Folgenden werden die charakteristischen Eigenschaften verschiedener Ausprägungen des Standards IEEE 802.11 aufgelistet.

#### **IEEE 802.11a**

- Frequenzbereich: 5,12 - 5,30 GHz
- 19 überlappungsfreie Kanäle (in Deutschland)
- max. Datenrate: 54 Mbit/s
- weniger genutztes Frequenzband → störungsarmer Betrieb
- höhere Gerätekosten

#### **IEEE 802.11b/g**

- Frequenzbereich: 2,4 GHz - 2,4835 GHz
- 3 überlappungsfreie Kanäle (in Deutschland)
- max. Datenrate: 54 Mbit/s (802.11b: 11 MBit/s)
- stark genutztes Frequenzband → Gefahr von Störungen
- 802.11g aktuell am weitesten verbreitet → geringe Gerätekosten
- DSSS für geringe Geschwindigkeiten
- OFDM für hohe Geschwindigkeiten

**IEEE 802.11n**

- Frequenzbereich: 2,4 GHz - 2,4835 GHz (+optional: 5,12 - 5,30 GHz)
- 3 (+19) überlappungsfreie Kanäle (in Deutschland)
- max. Datenrate: 600 Mbit/s
- Ablösung älterer Standards (z.B. 802.11g)

**IEEE 802.11p**

- Einsatz in Car-to-X-Netzwerken (vgl. Abschnitt 2.3.2)

**IEEE 802.11s**

- Standard zur Einrichtung von drahtlosen, vermaschten Netzwerken
- Mesh-Routing in der MAC-Schicht ("MAC Relaying") vorgesehen
- geringere Hardwareanforderungen und erhöhte Energieeffizienz
- evtl. zukünftig für einen Einsatz in Zellularen Transportsystemen interessant

**IEEE 802.11 (WiFi/WLAN)**

Hohe Datenübertragungsrate, weit verbreiteter Standard, gut geeignet für mobile Teilnehmer



Schlussfolgerung: Prinzipiell geeignet und daher weiter untersucht

IEEE 802.15.1**Bluetooth**

Bluetooth baut auf dem IEEE-Standard 802.15.1 auf und ermöglicht spontane Kommunikationsverbindungen zwischen verschiedenen Endgeräten in sogenannten Ad-hoc-Netzwerken. Bluetooth arbeitet auf dem lizenzfreien 2,4-GHz-ISM-Band und nutzt das FHSS-Verfahren mit 79 Frequenzstufen und bis zu 1.600 Frequenzwechseln pro Sekunde, um Interferenzen zu vermeiden. Bluetooth weist zwar einen geringeren Datendurchsatz als WLAN auf, hat sich aber durch das verwendete Frequenzhopping in Stahlumgebungen und Hochregallagern bewährt und ist auch für mobile Anwendungen gut geeignet. Um bestehende WLAN-Netze nicht durch Bluetooth zu stören, ist ein Blacklisting möglich, d.h. es können Kanäle festgelegt werden, die nicht für eine Nutzung durch Bluetooth zur Verfügung stehen. Der Energieverbrauch ist bei dieser Technik gering und durch die globale Verfügbarkeit sowie geringe Ge-

rätekosten hat sich Bluetooth als weltweiter Standard etabliert. Im Folgenden erfolgt eine Auflistung wichtiger Entwicklungstufen des Bluetooth-Standards.

### Bluetooth 1.1

- max. Datenrate: 732,2 kbit/s
- TDMA und FHSS

### Bluetooth 2.0 + EDR

- erhöhte Datenübertragungsgeschwindigkeit durch Enhanced Data Rate (EDR)
- max. Datenrate: 2,1 Mbit/s

### Bluetooth 3.0 + EDR

- max. Datenrate: 24 Mbit/s

### Bluetooth 4.0

- neueste Spezifikation 4.0 (verabschiedet am 17.12.2009)
- neuer Protokollstapel Low Energy
- Verbindungsaufbau in unter 5 ms

<b>Bluetooth</b>	
Hohe Datenübertragungsrate, verbreiteter Standard, geeignet für mobile Teilnehmer	
<input checked="" type="checkbox"/>	Schlussfolgerung: Prinzipiell geeignet und daher weiter untersucht

### WISA

WISA (Wireless Interface for Sensors and Actors) ist ein proprietäres Funkübertragungssystem der Firma ABB Stotz-Kontakt für die Steuerung von Automatisierungsanlagen. Die Bitübertragungsschicht entspricht wie bei Bluetooth dem Standard IEEE 802.15.1. WISA zeichnet sich durch einen äußerst geringen Energieverbrauch aus, weist durch das Buszugriffsverfahren TDMA ein deterministisches Zeitverhalten auf und kann von beliebig vielen Teilnehmern genutzt werden.

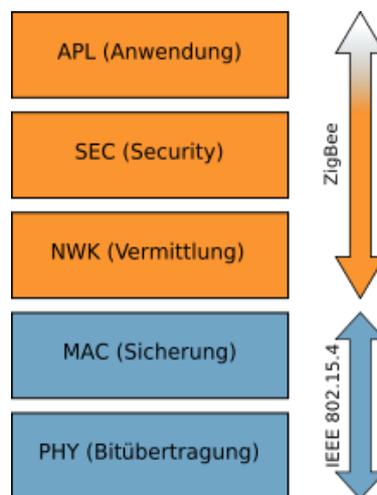
<b>WISA</b>	
geringe Reichweite, fehlende Herstellerunabhängigkeit, für Sensor-/Aktor-Kommunikation optimiert	
<input type="checkbox"/>	Schlussfolgerung: Nicht weiter verfolgt

IEEE 802.15.4

Der Standard IEEE 802.15.4 definiert die untersten beiden Schichten des OSI-Modells. Standards für Funknetze wie ZigBee, WirelessHART oder ISA100.11a setzen auf IEEE 802.15.4 mit eigenen Routing-Protokollen und mit einer Anwendungsschnittstelle auf. Das Protokoll ist auf eine geringe Leistungsaufnahme für einen langen Betrieb über Batterieversorgung hin optimiert und nutzt lizenzfreie ISM-Bänder. Daher muss auch der Parallelbetrieb mit anderen Sendern auf diesen Frequenzen, insbesondere WLAN und Bluetooth, berücksichtigt werden. Der Standard IEEE 802.15.4 eignet sich aufgrund seiner energieeffizienten Auslegung sehr gut für den Einsatz in drahtlosen Sensornetzen (Wireless Sensor Networks, WSN).

**ZigBee**

- konzipiert für Anwendungen in der Gebäudesteuerung und die Steuerung, Überwachung und Automatisierung von Fertigungsprozessen
- Setzt auf PHY und MAC Layer nach IEEE 802.15.4 auf (Abbildung 6-10).



**Abbildung 6-10: Protokollstapel IEEE 802.15.4 und ZigBee**

- Frequenzbereiche: 868 MHz / 2,4 GHz / (915 MHz, nur USA)
- 1 Kanal (868 MHz) + 16 Kanäle (2,4 GHz)
- max. Datenrate: 250 kbit/s (868 MHz: 20 kbit/s)
- CSMA/CA oder Slotted CSMA/CA (Superframe-Struktur mit Beacon-Frames in Intervallen von 15 ms - 252 s)
- max. Teilnehmer: 65.536 ( $2^{16}$ )
- max. Paketgröße: 127 Byte

- Dauer Verbindungsaufbau:  $\leq 30$  ms
- Verbindung auf Kurzstrecken: 10 - 100 m
- Topologien: Stern, Peer-to-Peer und Mesh (inkl. Multihop)
- Während der Projektlaufzeit wurde im Rahmen einer Studienarbeit eine Untersuchung anhand eines AVR Raven Starterkit durchgeführt.
- Vergleich mit Bluetooth: ZigBee für kleinste Datenmengen in großen Netzen optimiert, Bluetooth für größere Datenmengen in kleinen Netzen

### ZigBee

Vergleichsweise geringe Datenrate, sämtliche Netzwerk-Komponenten müssen das Routing von Datenpaketen anderer Teilnehmer unterstützen.

etablierter Standard, für mobile Teilnehmer gut geeignet, (quasi) unbegrenzte Teilnehmerzahl, Ad-hoc-Netzwerk möglich



Schlussfolgerung: Prinzipiell geeignet und daher weiter untersucht

### WirelessHART

WirelessHart ist ein Funkstandard für die Prozessautomatisierung und basiert ebenfalls auf IEEE 802.15.4. WirelessHART verwendet TDMA als Übertragungsverfahren. Als Meshnetzwerk ist es konzeptionell darauf ausgelegt, alternative Funkverbindungswege nutzen zu können. In der Praxis wird bedingt durch das verwendete Timing des TDMA-Verfahrens bei maximal 10 Hops ein Limit erreicht.

### WirelessHART

Sämtliche Netzwerk-Komponenten müssen das Routing von Datenpaketen anderer Teilnehmer unterstützen, Zeitsynchronisation und Netzwerk-ID müssen ständig von allen angemeldeten Geräten versendet werden, unterstützt nur HART-Datenpakete.



Schlussfolgerung: Nicht weiter verfolgt

### ISA100.11a .

ISA100.11a ist ein offener Funkstandard für die Prozessautomatisierung und wurde von der International Society of Automation (ISA) entwickelt. ISA100.11a baut wie WirelessHART und ZigBee auf IEEE 802.15.4 auf und zielt auf die gleichen Anwendungsdomänen ab. ISA100.11a hatte zum Entscheidungszeitpunkt dieses Projekts keine Relevanz, da die Spezifikation noch nicht abgeschlossen war.

**ISA100.11a**

geringer Entwicklungsstand



Schlussfolgerung: Nicht weiter verfolgt

**6LoWPAN**

6LoWPAN (IPv6 over Low power WPAN) ist ein Funkstandard, der durch ein Header-Kompressionsverfahren eine effizientere Übermittlung von IPv6-Paketen über IEEE-802.15.4-basierte Netzwerke ermöglichen soll. 6LoWPAN verfolgt das Ziel, drahtlose Personal Area Networks (PANs) mit möglichst geringem Aufwand in bestehende Netze integrieren zu können. Um IPv6 auf IEEE 802.15.4 verwenden zu können, sind einige Anpassungen nötig.

So erfordert IPv6 eine minimale Paketgröße von 1.280 Byte, IEEE 802.15.4 bietet jedoch nur eine Paketgröße von 127 Byte. Daher ermöglicht der 6LoWPAN Layer eine Fragmentierung der IP-Pakete, wodurch die geforderte Paketgröße virtuell erreicht werden kann. Zudem kann 6LoWPAN den Platzbedarf für den IPv6- und den UDP-Header von 48 Byte auf bis zu 7 Byte komprimieren. Somit steht mehr Platz für Nutzdaten zur Verfügung. 6LoWPAN kann darüber hinaus das Routing durch ein Mesh-Netzwerk übernehmen. Hierfür wird vor die Header der Fragmentierung und der Komprimierung ein Mesh-Header mit der Identifikationsnummer des Start- des Ziel-Knotens sowie der Anzahl der übrigen Sprünge gesetzt.

6LoWPAN hatte zum Entscheidungszeitpunkt dieses Projekts keine Relevanz, da die Spezifikation noch nicht abgeschlossen war. Für einen zukünftigen Einsatz in Zellularen Transportsystemen kann 6LoWPAN jedoch durchaus von Interesse sein.

**6LoWPAN**

geringer Entwicklungsstand



Schlussfolgerung: Nicht weiter verfolgt

Mobilfunkstandards

Ein Mobilfunksystem besteht aus mobilen Endgeräten und einem Netz von Basisstationen, die von Mobilfunkbetreibern aufgebaut, betrieben und gewartet werden. Beim Mobilfunk basiert lediglich die letzte Meile zwischen Mobiltelefon und Basisstation auf

Funkübertragung. Mobilfunksysteme der zweiten Generation (2G) basieren auf dem Übertragungsstandard **GSM** (Global System for Mobile Communications). Während der Entwicklung von 2G- hin zu 3G-Netzen wurden einige Übertragungsprotokolle eingeführt, die den GSM-Standard erweitern und der Generation 2,5 (2,5G) zugeordnet werden. Dazu zählen **HSCSD** (High Speed Circuit Switched Data), **GPRS** (General Packet Radio Service) und **EDGE** (Enhanced Data Rates for GSM Evolution). Die dritte Generation (3G) der Mobilfunksysteme wurde gezielt auf Datenübertragung und entsprechende Dienste (z.B. mobiles Breitbandinternet, Videotelefonie) ausgelegt. 3G wird synonym zur Übertragungstechnik **UMTS** (Universal Mobile Telecommunication System) verwendet, die durch eine paketorientierte Datenübermittlung eine bessere Breitbandnutzung und somit schnellere Übertragungsraten ermöglicht. UMTS unterscheidet bei der Übermittlung vier Zellgrößen (Piko-, Mikro-, Makro und Satellitenzelle), die hierarchisch aufgebaut sind und so unterschiedliche maximale Übertragungsraten in einzelnen Zellen zur Verfügung stellen. **LTE** (Long-Term-Evolution) ist der Mobilfunkstandard der vierten Generation (4G) und tritt somit die UMTS-Nachfolge an. Das Grundschema von UMTS wird bei LTE beibehalten, jedoch erreicht LTE mit bis zu 300 Mbit/s deutlich höhere Downloadraten. Vorteilhaft sind bei LTE auch die sehr geringen Latenzzeiten, die Verzögerungszeiten vom Mobiltelefon bis zum Festnetz von kleiner 5 ms ermöglichen.

<b>Mobilfunkstandards (2G/2,5G/3G/4G)</b>	
Provider bestimmen wirtschaftliche und technische Leistungsmerkmale, für Mobilfunk/Outdoor-Bereich optimiert	
	Schlussfolgerung: Nicht weiter verfolgt

### Sonstige Funkstandards

#### **DECT**

DECT (Digital European Cordless Telecommunications) ist ein ETSI-Standard (EN 300 175) für die Luftschnittstelle schnurloser Telefone sowie für die kabellose Datenübertragung. DECT spezifiziert ein Protokoll für die ISO/OSI-Schichten 1 bis 3 und ist für die Übertragung von Sprache und Daten optimiert. DECT arbeitet grundsätzlich verbindungsorientiert und somit deterministisch. Die Übertragung basiert auf einem

TDD(Time Division Duplex)/TDMA- und FDMA-Verfahren und arbeitet in Europa im Frequenzbereich von 1,88 GHz bis 1,90 GHz, in dem 10 Kanäle definiert sind.

<b>DECT</b>	
hohe Latenzzeit, Nutzung eines lizenzierten Frequenzbereichs	
✘	Schlussfolgerung: Nicht weiter verfolgt

## HIPERLAN

Unter der Bezeichnung HIPERLAN (High Performance Radio Local Area Network) sind die vier Standards HIPERLAN/1, HIPERLAN/2, HIPERACCESS (früher HIPERLAN/3) und HIPERLINK (früher HIPERLAN/4) zusammengefasst. Die Standards bauen aufeinander auf und stellen eine alternative Technologie zum IEEE-802.11-Standard dar.

### HIPERLAN/1 (EN 300652)

- Frequenzbereich: 5,12 - 5,30 GHz
- MAC / PHY kompatibel zu IEC 15 802.1
- 5 Kanäle
- Max. Datenrate: 23 Mbit/s
- Max. Reichweite: 50 m (Indoor)

### HIPERLAN/2

- Frequenzbereiche: 5,12 - 5,30 GHz / 5,47 - 5,725 GHz
- Max. Datenrate: 54 Mbit/s

### HIPERACCESS (früher *HIPERLAN/3*)

- Überbrückung der letzten Meile von WAN<sup>17</sup> zu Teilnehmeranschluss
- Max. Datenrate: 23 Mbit/s
- Max. Reichweite: 5 Kilometer

---

<sup>17</sup> Wide Area Network

### **HIPERLINK** (früher *HIPERLAN/4*).

- feste Punkt-zu-Punkt-Verbindungen
- Max. Datenrate: 155 Mbit/s
- Max. Reichweite: 150 m

<b>HIPERLAN</b>	
geringe Verbreitung, lizenzbehaftete Technologie	
	Schlussfolgerung: Nicht weiter verfolgt

### **Nanonet**

Nanonet ist ein von der Firma Nanotron entwickeltes WLAN. Nanonet arbeitet im 2,4-GHz-ISM-Band. Nanonet verwendet Chirp Spread Spectrum (CSS) als Übertragungsverfahren. CSS arbeitet mit Chirp-Impulsen, die in einer festen Zeitspanne einen bestimmten Frequenzbereich überstreichen. Nanonet nutzt eine sehr hohe Bandbreite, wodurch sich nur wenige Geräte in einer Funkzelle parallel betreiben lassen. Die Datenrate liegt bei maximal 2 Mbit/s. Als Zugangsverfahren nutzt Nanonet u.a. TDMA (wie Bluetooth) und CSMA/CA (wie ZigBee).

<b>Nanonet</b>	
geringe Reichweite, geringe Datenrate, starke Koexistenzprobleme mit WLAN	
	Schlussfolgerung: Nicht weiter verfolgt

### **SRD**

SRD (Short Range Devices) ist eine Funktechnik für die Sprach- oder Datenübertragung über kurze Entfernungen. Sie wird u.a. in Fernbedienungen für Fernseher oder Audio-Anlagen und in Zentralverriegelungen von Fahrzeugen eingesetzt. Short Range Devices können anmelde- und lizenzfrei genutzt werden. SRD nutzt mehrere lizenzfreie Frequenzbänder (vorwiegend ISM). Nutzbar sind die Frequenzbänder bei 433 MHz, 868 MHz, 902 MHz, 2,4 GHz und 5,7 GHz. SRD-Systeme arbeiten unidirektional, d.h. sie haben keinen Rückkanal für die Bestätigung der ausgeführten Steuerfunktion. Die korrekte Funktionsausführung kann nur durch Sichtkontrolle überprüft werden.

**SRD (Short Range Devices)**

nicht für mobile Teilnehmer geeignet, geringe Datenrate, keine bidirektionale Kommunikation



Schlussfolgerung: Nicht weiter verfolgt

**WiMAX (IEEE 802.16e)**

WiMAX bezeichnet Standards für die Entwicklung von drahtlosen Städtenetzen, welche über WLAN-Infrastrukturen verbunden werden können. Der Standard IEEE 802.16 ermöglicht Datenraten für einen Endabnehmer von bis zu 70 MBit/s. WiMAX findet inzwischen sowohl als stationäre (fixed WiMAX) als auch als Funktechnologie für mobiles Internet mit hohen Datenraten in Mobilfunknetzen seine Anwendung. Der Versorgungsradius einer Basisstation liegt üblicherweise zwischen 2 und 5 km.

**WiMAX (IEEE 802.16e)**

Provider bestimmen wirtschaftliche und technische Leistungsmerkmale, für Mobilfunk optimiert, geringe Verbreitung, Nutzung eines lizenzbehafteten Frequenzbereichs



Schlussfolgerung: Nicht weiter verfolgt

**Gewählte Funkstandards**

Als prinzipiell zur Verwendung in einem Kommunikationssystem für ein Zellulares Transportsystem geeignet werden folgende drei Funkstandards eingestuft:

- WiFi/WLAN (IEEE 802.11a/b/g/n)
- Bluetooth (IEEE 802.15.1)
- ZigBee (IEEE 802.15.4)

Wie gut diese drei Standards die in Abschnitt 3.2.2 formulierten Anforderungen erfüllen können, wird anhand einer gewichteten Bewertungsmatrix gezeigt:

Tabelle 6-7: Gewichtete Bewertung ausgewählter Funkstandards

Anforderung	Gewichtung	Funkstandard 1 WiFi/WLAN		Funkstandard 2 Bluetooth		Funkstandard 3 ZigBee	
A1 <sub>K</sub>	18%	3	0,54	2	0,36	1	0,18
A2 <sub>K</sub>	16%	3	0,48	2	0,32	3	0,48
A3 <sub>K</sub>	12%	1	0,12	2	0,24	2	0,24
A4 <sub>K</sub>	12%	3	0,36	3	0,36	2	0,24
A5 <sub>K</sub>	16%	1	0,16	1	0,16	1	0,16
A6 <sub>K</sub>	11%	2	0,22	2	0,22	2	0,22
A7 <sub>K</sub>	10%	3	0,30	3	0,30	3	0,30
A8 <sub>K</sub>	5%	1	0,05	2	0,10	3	0,15
$\Sigma$	100%	$\Sigma$	2,23	$\Sigma$	2,06	$\Sigma$	1,97

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

A1<sub>K</sub> – Bedarfsgerechte Bereitsstellung benötigter Daten  
 A2<sub>K</sub> – Vollständige Mobilität für Sender/Empfänger  
 A3<sub>K</sub> – Einsatz in industriellem Umfeld  
 A4<sub>K</sub> – Wirtschaftlichkeit, Anbieterunabhängigkeit

A5<sub>K</sub> – Kommunikation in Echtzeit  
 A6<sub>K</sub> – Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit  
 A7<sub>K</sub> – Datensicherheit/Security  
 A8<sub>K</sub> – Energieversorgung

Unter Berücksichtigung dieser Bewertung erscheint der WLAN-Standard 802.11 als am besten für den vorliegenden Einsatzfall geeignet. Nutzt man WLAN im 5-GHz-Band (IEEE 802.11a/IEEE 802.11n), kann sogar noch eine Verbesserung der Bewertung hinsichtlich Kriterium A3<sub>K</sub> – *Einsatz in industriellem Umfeld* erreicht werden, da in diesem Frequenzbereich mit einer geringeren Funkbeeinflussung durch andere Funknetze zu rechnen ist.

Da sich alle drei betrachteten Funktechnologien in ISM-Frequenzbändern bewegen, kann es nötig sein, die Koexistenzfähigkeit mit bereits vorhandenen Funklösungen durch eine entsprechende Funkplanung sicherzustellen. Diese berücksichtigt – wie oben erwähnt – die durch andere Sender belegten Kanäle/Frequenzen, die räumliche Anordnung der weiteren Funknetze sowie die Zeiträume/Intervalle, in denen andere Sender aktiv sind.

Festzuhalten bleibt, dass es die eine ideale Funklösung für ein Zellulares Transportsystem nicht gibt. Zu unterschiedlich können die einzelnen Anforderungen ausgeprägt sein und zu verschieden sind auch die Anwendungsfälle, für die die bestehenden Standards optimiert sind. In diesem Abschnitt wurde jedoch gezeigt, dass die

Eigenschaften etablierter Standards wie WLAN, Bluetooth und ZigBee deren Einsatz in einem Kommunikationssystem der Zellularen Fördertechnik prinzipiell erlauben. Vorhandene Einschränkungen (z.B. beschränkte Echtzeitfähigkeit) können durch entsprechende Gegenmaßnahmen auf Protokollebene adressiert werden (z.B. Heartbeat-Signal). Abbildung 6-11 zeigt eine mögliche Klassifizierung nach Echtzeitanforderungen unterschiedlicher Anwendungen in der Prozessautomatisierung, wie sie von der International Society of Automation (ISA) vorgesehen wird.

Kategorie	Klasse	Anwendung	Beschreibung	
Sicherheit	0	Notfallmaßnahmen	<i>immer zeitkritisch</i>	→ Notabschaltung
Prozesssteuerung	1	geschlossener Regelkreis	<i>oft zeitkritisch</i>	→ direkte Aktorsteuerung
	2	geschlossener Regelkreis	<i>gewöhnlich unkritisch</i>	→ niederfrequenter Regelkreis
	3	offener Regelkreis	<i>human-in-the-loop</i>	→ z.B. manuelle Pumpensteuerung
Monitoring	4	Visualisierung	<i>kurzfristige betriebliche Auswirkungen</i>	→ Wartung, Internet über WLAN
	5	Aufzeichnung	<i>keine unmittelbaren Konsequenzen</i>	→ z.B. Condition Monitoring

**Abbildung 6-11: Anwendungsklassifizierung nach dem ISA-SP100 Komitee [ISA-2008]**

Die Standards IEEE 802.11a/b/g/n, IEEE 802.15.1 und IEEE 802.15.4 können in ihrer Grundausprägung lediglich für Anwendungen der Klassen 3 bis 5 eingesetzt werden, da sie keine harte Echtzeitfähigkeit garantieren können. Für die Klassen 0, 1 und 2 existieren derzeit nur proprietäre Lösungen bzw. Speziallösungen auf Basis etablierter Standards wie Bluetooth.

Die Echtzeitfähigkeit wird für diese kritischen Klassen über Alive- bzw. Heartbeat-Signale gewährleistet. Die dahinter stehende Logik löst ein Notaus aus, wenn die erwarteten Datenpakete nicht innerhalb eines definierten Zeitfensters eintreffen. Daher führt ein unterbrochener Datenstrom bzw. ein verspätetes Datenpaket automatisch zu einem (evtl. nicht gerechtfertigten) Notaus. Somit gelten für die stark zeitkritische Kommunikation besonders hohe Anforderungen bezüglich Koexistenz und Zuverlässigkeit des Funkstandards. Wie in Abschnitt 3.2.2 allerdings bereits festgestellt wurde, sind derart zeitkritische Anwendungen nicht Gegenstand der Fahrzeug-zu-Fahrzeug- bzw. Fahrzeug-zu-Peripherie-Kommunikation einer Zellularen Fördertechnik und spielen daher für die Gestaltung der Kommunikationssysteme eine untergeordnete Rolle.

### 6.2.2 Datenformate

Auf Basis der Datenklassifizierung in Abschnitt 6.1.2 fokussiert die Suche nach geeigneten Datenformaten zwei unterschiedliche Ziele. Bei einem Teil der zu übertragenden Informationen steht die Übertragungsgeschwindigkeit im Vordergrund, allerdings weisen diese Informationen eine geringe Komplexität auf. So genügt für einen einfachen Schaltbefehl als Information die ID des entsprechenden Steuerungsausgangs und eine logische „0“ oder „1“ für den gewünschten Schaltzustand („Aus“ oder „An“).

Andere Informationen wie Fahrauftragsdaten oder Streckenreservierungen können eine wesentlich komplexere Struktur aufweisen, sind jedoch nicht auf eine besonders schnelle Übermittlung angewiesen, da die realen Prozesse, die durch diese Daten beeinflusst werden, in größeren Zeitrastern (i.d.R. mehrere Sekunden) ablaufen. Dieser Gruppe komplexer Informationen gehören auch sämtliche Nachrichten an, die bei der Materialflusssteuerung mittels Softwareagenten zur Auftragsdisposition sowie zur Organisation und Koordination im Multiagentensystem benötigt werden.

Aufgrund dieser sehr unterschiedlichen Anforderungsprofile werden für die Kommunikation in Zellularen Transportsystemen zwei Datenformate festgelegt, die den verschiedenen Informationsarten jeweils zugeordnet sind. So werden einfache, aber zeitkritische Information lediglich nach einem vorgegebenen Muster binär kodiert, während für komplexe Datensätze XML (Extensible Markup Language, [W3C-2008]) verwendet wird. XML ermöglicht die Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdaten und ist somit sowohl menschen- als auch maschinenlesbar. XML kann u. a. für einen plattformunabhängigen Datenaustausch zwischen Computersystemen eingesetzt werden. Folgendes Beispiel zeigt einen XML-kodierten Transportauftrag für automatisierte Transportfahrzeuge:

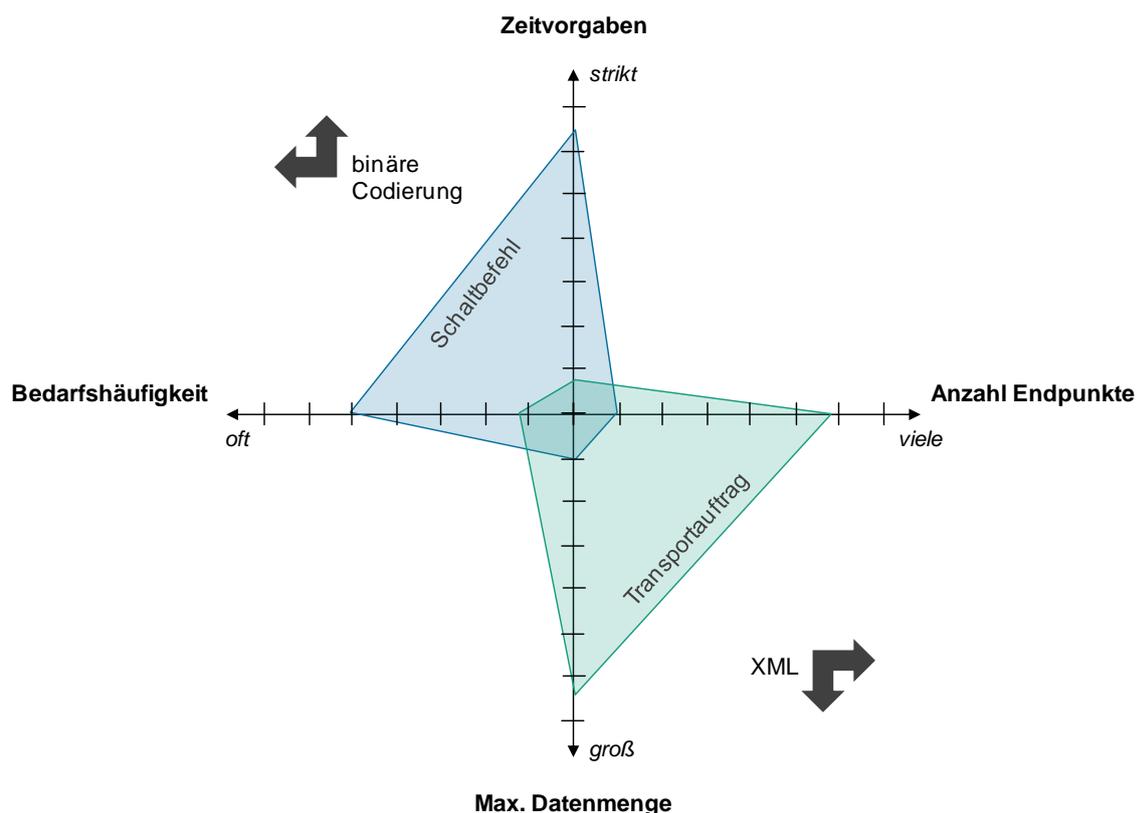
```

<Auftrag>
  <DataName>ID_0</DataName>
    <Auftragsart>Transport</Auftragsart>
    <Einlasszeit>0</Einlasszeit>
    <Prioritaet>0</Prioritaet>
    <Start>
      <DataName>Start_ID_0</DataName>
      <Name>Übergabestation_AKL_Gasse_1</Name>
      <PositionX_mm>17899</PositionX_mm>
      <PositionY_mm>5390</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_0</DataName>
      <Name>Übergabestation_Kommissionierstation_2</Name>
      <PositionX_mm>6333</PositionX_mm>
      <PositionY_mm>11407</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>ZFT-FTF_1</Reserviert>
</Auftrag>

```

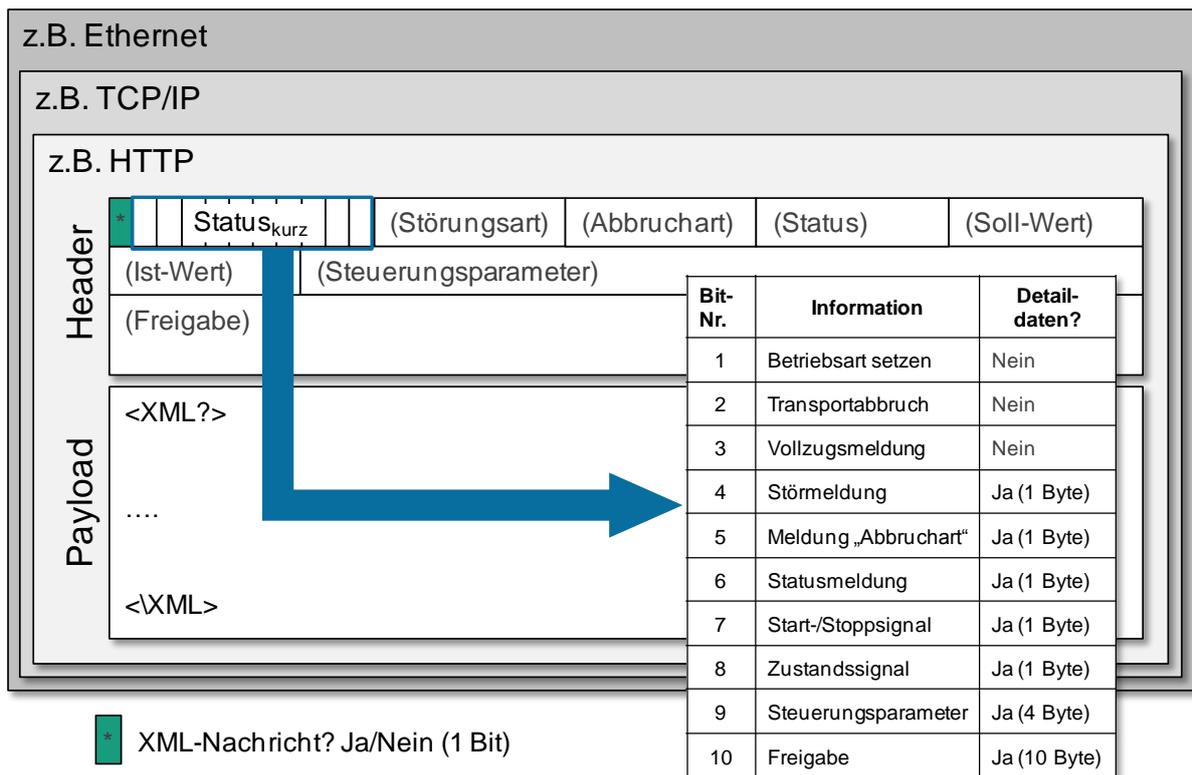
Am Beispiel des Transportauftrags lässt sich die XML-typische Baumstruktur erkennen. Spezielle Parser erlauben die Verarbeitung von XML-Dokumenten und die Weitergabe relevanter Informationen an andere Softwarekomponenten. Durch die Angabe der logischen Bedeutung der einzelnen Informationen durch sogenannte Markups (in XML auch als Tags bezeichnet, z.B. <Auftrag>) nimmt das Datenvolumen deutlich zu und das Verhältnis von Nutzdaten zu Begleitdaten verschlechtert sich. Zudem müssen Sender und Empfänger dasselbe XML-Schema nutzen, um die Tags deuten zu können und die enthaltenen Daten korrekt zu interpretieren.

Eine binäre Kodierung ermöglicht eine Darstellung der Nutzdaten ohne großen Overhead. Diese Art der Kodierung ist allerdings nur maschinenlesbar. Im Gegensatz zur Kodierung in XML lassen sich bei einer binären Kodierung die enthaltenen Informationen nur schwer erweitern, da dem Empfänger die genaue Abfolge der Informationen bekannt sein muss, um diese interpretieren zu können. Abbildung 6-12 verdeutlicht die Zuordnung der beiden Datenformate in Abhängigkeit von den Eigenschaften der zu übertragenden Information.



**Abbildung 6-12: Auswahl geeigneter Datenformate in Abhängigkeit der Informationsart**

Beide gewählten Datenformate sollen auf Basis eines einzigen Datagramms übertragen werden. Ein Konzept für dieses Datagramm ist in Abbildung 6-13 dargestellt. Mit Hilfe dieses Datagramms ist es möglich, verschiedene Informationsarten gleichzeitig zu versenden, wenn die Zeitvorgaben dies zulassen. Auf diese Weise können die Kommunikationskanäle effizient genutzt werden. Wie oben erwähnt ist es für die Übertragung zeitkritischer Nachrichten aber auch wichtig, Daten rein binär kodiert übertragen zu können.



**Abbildung 6-13: Entwurf für ein Datagramm mit flexibler Länge**

Beim vorgestellten Datagramm erfolgt daher über das erste Bit die Abfrage, ob das Datenpaket zusätzliche XML-Daten enthält. Ist dies nicht der Fall, so weiß der Empfänger, dass es sich um eine evtl. zeitkritische Kurznachricht handelt und er kann diese entsprechend behandeln. Diesem Start-Bit folgen zehn weitere Bits, von denen die ersten drei direkt eine Information kodieren (Betriebsart: an/aus, Transportabbruch: ja/nein, Vollzugsmeldung: ja/nein), während die sieben weiteren Bits angeben, ob Detaildaten zu verschiedenen Informationsarten folgen. Sind diese letzten Bits alle auf 0 gesetzt, so endet die Nachricht an dieser Stelle. Maximal sind für eine Nachricht dieser Art inklusive sämtlicher Detaildaten 23 Byte vorgesehen.

Eine weitere Möglichkeit zur angepassten Übertragung der verschiedenen Datenformate liegt in der parallelen Nutzung zweier Kommunikationstechnologien. So könnte z.B. WLAN zur Übertragung von Daten im XML-Format genutzt werden, während über ZigBee nur binär kodierte Nachrichten übermittelt werden. In diesem Fall lassen sich die XML-Daten über das dafür vorgesehene Netzwerkprotokoll SOAP übertragen [Wil-2006]. Um eine gegenseitige Funkbeeinflussung der beiden Kommunikationstechniken zu vermeiden, sollte WLAN bei 5 GHz und ZigBee bei 2,4 GHz betrieben werden. Dieser Alternativlösung stehen höhere Komponentenkosten entgegen.

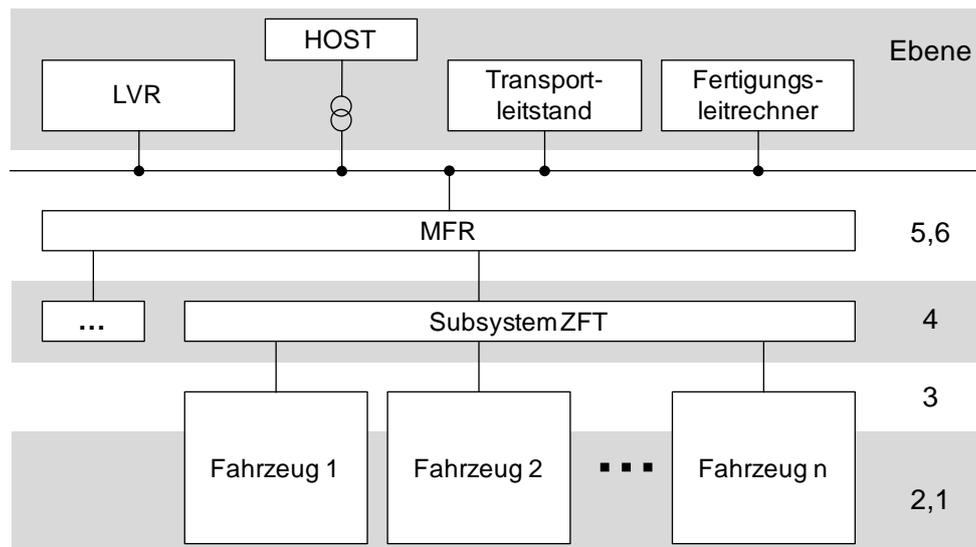
Im Gegenzug bietet sie zwei komplett getrennte Kommunikationskanäle für zeitkritische und nicht-zeitkritische Nachrichten.

### **6.2.3 Kommunikationskonzepte**

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Abschnitte werden in diesem Abschnitt Kommunikationskonzepte für drei unterschiedliche Ansätze zur Steuerung einer Zellularen Fördertechnik vorgestellt. Die Steuerungsarchitekturen reichen von einer herkömmlichen hierarchischen Steuerung bis hin zur dezentralen Steuerung nach dem Internet-der-Dinge-Prinzip (vgl. Abschnitt 2.2).

#### **Kommunikationskonzept für eine hierarchische Steuerungsorganisation**

Ein erstes Kommunikationskonzept orientiert sich am Aufbau der Materialflusssteuerung nach dem VDMA-Einheitsblatt 15276 [VDMA15276]. Die Steuerung ist klar hierarchisch gegliedert (vgl. Abbildung 6-14). Aufgaben der Ebenen 6 und 5 (Kopplung an übergeordnete Systeme, Steuerung sämtlicher Transportvorgänge des Materialflusssystems) werden von einem oder mehreren miteinander vernetzten Materialflussrechnern übernommen. Ebene 4 steuert jeweils abgeschlossene Subsysteme, wie z.B. ein Hochregallager, ein Fahrerloses Transportsystem oder in diesem Fall ein Zellulares Transportsystem. Hardwaretechnisch wird diese Ebene über Industrie-PCs oder Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) realisiert. Die Subsystemsteuerung verwaltet Topologiedaten, Zustandsinformationen und Auftragsbestände des zugeordneten Transportsystems. Die Steuerungsfunktionen der Ebenen 3, 2 und 1 sind in diesem ersten Konzept eines Zellularen Transportsystems analog zu Fahrerlosen Transportsystemen direkt auf den einzelnen Fahrzeugen angesiedelt. Ebene 3 kontrolliert den Betrieb einzelner Fördermittel, Ebene 2 übernimmt die Führung und Überwachung der Antriebe und Ebene 1 bildet mit Hilfe von Sensoren (Geber) und Aktoren (Antriebe, Stellglieder) die Schnittstelle zum physischen Materialflussprozess.



LVR: Lagerverwaltungsrechner  
MFR: Materialflussrechner

**Abbildung 6-14: Steuerungsorganisation nach VDMA 15276**

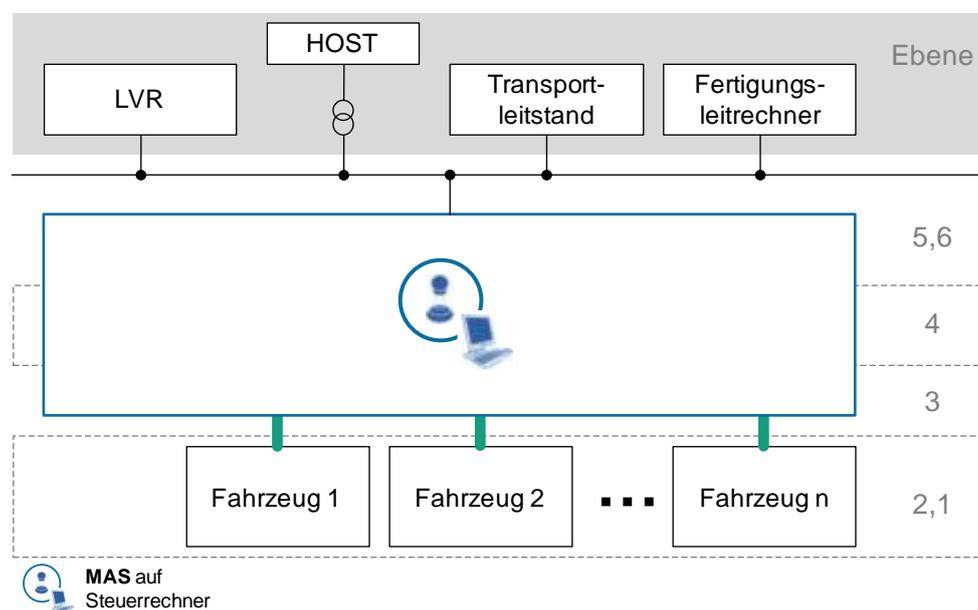
Die Kommunikation zwischen Materialflussrechner und Subsystemsteuerung kann über herkömmliche Feldbusssysteme (z.B. PROFIBUS) stattfinden. Lediglich die Übertragung von Daten (z.B. Schaltaufträgen, Statusmeldungen) zwischen der Subsystemsteuerung und den einzelnen Fahrzeugen erfolgt über einen drahtlosen Kommunikationsstandard wie WLAN. Da die stationäre Steuerung über einen Funkkanal nur mit jeweils einem Fahrzeug gleichzeitig kommunizieren kann, ist in Abhängigkeit des üblicherweise auftretenden Kommunikationsvolumens die Anzahl der benötigten Funkkanäle zu bestimmen. Eine direkte Kommunikation zwischen den Fahrzeugen bzw. zwischen den Fahrzeugen und peripheren Einrichtungen wie Übergabestationen ist in diesem Kommunikationskonzept nicht vorgesehen.

Eine nähere Betrachtung dieses Konzepts soll an dieser Stelle nicht erfolgen, da es dem Grundgedanken einer selbststeuernden Zellularen Fördertechnik entgegsetzt und sich von einem zentral gesteuerten Fahrerlosen Transportsystem kaum unterscheidet. Mit der Realisierung intralogistischer Prozesse durch einen Schwarm mobiler Roboter sollte auch ein Umdenken auf Seiten der Steuerungsarchitektur einhergehen. Zwei derartige Ansätze werden im Folgenden beschrieben und um geeignete Kommunikationskonzepte ergänzt.

### **Kommunikationskonzept für die Steuerung mittels Multiagentensystem**

Die beiden weiteren Steuerungsansätze folgen dem Internet-der-Dinge-Paradigma (vgl. Abschnitt 2.2.3) und verwenden Softwareagenten zur Realisierung der Koordi-

nation und Kooperation im Fahrzeugkollektiv. Bei der Umsetzung einer funktionsorientierten Modularisierung des Materialflusssystemes gehen beide Ansätze jedoch unterschiedlich weit. So wird in einer ersten Stufe jedes Fahrzeug durch einen Softwareagenten repräsentiert, der den Fahrzeugstatus überwacht und sich an Auftragsverhandlungen beteiligt. Die Softwareagenten laufen allerdings von den Fahrzeugen räumlich getrennt auf einem zentralen Server oder in einem Server-Cluster. Neben den Fahrzeugagenten sind auch Serviceagenten (z.B. Auftrags- oder Visualisierungsagent) Teil des Multiagentensystems und sorgen für die notwendige Anbindung an Datenverwaltungssysteme übergeordneter Ebenen (z.B. Lagerverwaltungsrechner). Obwohl bei dieser Art der Steuerung weiterhin eine zentrale Rechnerplattform genutzt wird, birgt dieser Ansatz doch Vorteile gegenüber der zuvor vorgestellten hierarchischen Steuerungsorganisation. Die Komplexität der Steuerungslogik lässt sich nach dem Prinzip „Teile und Herrsche“ reduzieren und die Reaktionsfähigkeit auf ein dynamisches Umfeld wird verbessert [Sch-2010]. Abbildung 6-15 stellt den agentenbasierten Steuerungsansatz den Steuerungsebenen nach VDMA 15276 gegenüber, die weitestgehend durch das Multiagentensystem aufgelöst werden.



**Abbildung 6-15: Einsatz eines Multiagentensystems (MAS) zur Steuerung der Zellularen Fördertechnik**

Ein Großteil des benötigten Datenaustauschs erfolgt somit innerhalb des Multiagentensystems. Auch komplexe Aufgaben, wie Auftragsverhandlungen oder Routing, werden zunächst von den Softwareagenten auf der Rechnerplattform gelöst. Daher

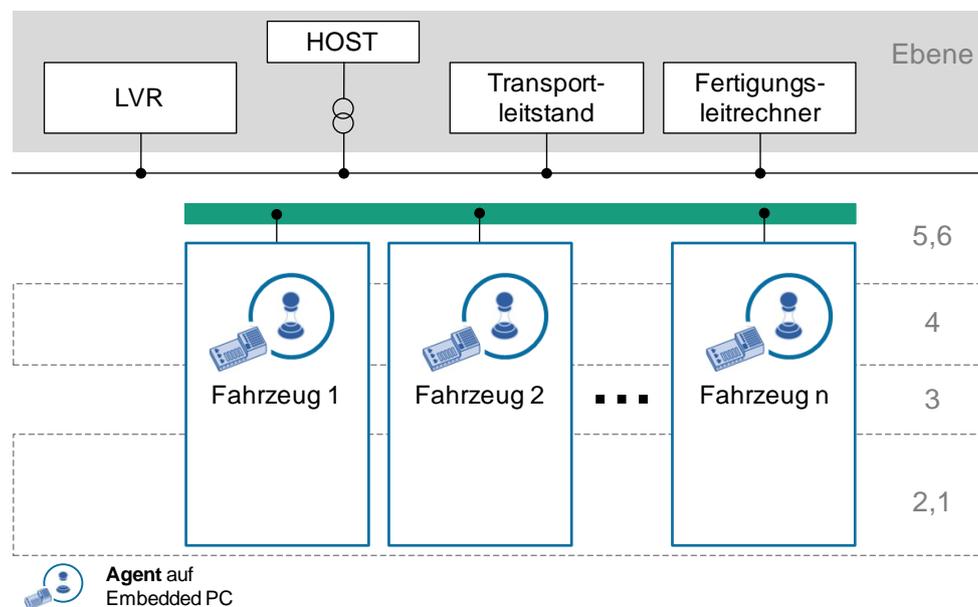
ist die Übermittlung und Verarbeitung des verwendeten XML-Datenformats als unkritisch einzustufen. Anschließend werden die relevanten Daten in komprimierter, binärer Form an die jeweilige Fahrzeugsteuerung (SPS) gesendet. So sorgt ein Fahrzeugagent im Fall einer gewonnenen Auftragsauktion dafür, dass das von ihm repräsentierte Fahrzeug die entsprechenden Fahr- und Lastwechselfahrträge erhält. Die Fahrzeugsteuerung ermöglicht schließlich eine selbstständige Navigation und Hinderniserkennung während der Auftragsbearbeitung.

Das zu übermittelnde Datenvolumen zwischen Multiagentensystem und Fahrzeugen ist somit als höher einzustufen als bei einer komplett hierarchischen Steuerungsorganisation, da größere Datenmengen direkt auf den Fahrzeugsteuerungen verarbeitet werden. Allerdings erfolgt der Austausch komplexer Informationen (Topologie, Layout, Transportauftragsdaten, Auftragsverhandlungen) innerhalb eines Rechnersystems, was den effizienten Austausch großer Datenmengen erheblich vereinfacht. Die Steuerung der Fahrzeuge benötigt lediglich Nachrichten mit kleinen Datenmengen (z.B. Zielkoordinaten, Schaltaufträge, Lastwechselkoordination), um die Transportaufgabe korrekt ausführen zu können. Und auch in die Gegenrichtung fließen nur geringe Datenmengen für Status-, Fehler- oder Vollzugsmeldungen, die dann vom assoziierten Agenten interpretiert werden. Somit kann die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und der agentenbasierten Steuerung prinzipiell über jeden der gewählten Funkstandards (WLAN, Bluetooth, ZigBee) erfolgen. Bei der Auswahl sollte v.a. das konkrete Anwendungsumfeld berücksichtigt werden, um Koexistenzprobleme mit weiteren Funknetzen zu verhindern.

### **Kommunikationskonzept für eine dezentrale Steuerung durch verteilte Agenten**

Die zweite Stufe einer Steuerungsorganisation nach dem Internet-der-Dinge-Paradigma sieht die komplette Verteilung der Steuerungslogik auf die Fahrzeuge vor. Reicht im vorangegangenen Szenario noch eine herkömmliche Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) für die Datenverarbeitung aus, so erfordert die Verortung des Softwareagenten direkt auf den Fahrzeugen den Einsatz von leistungsfähigeren Rechnerplattformen [Ten-2012]. Daher sind die Fahrzeuge bei diesem Konzept mit einem Embedded PC mit Soft-SPS ausgestattet (Abbildung 6-16). Dabei handelt es sich um einen modular aufgebauten Industrie-PC, der sowohl über ein herkömmliches Betriebssystem (z.B. Windows, Linux) als auch über ein SPS-Betriebssystem verfügt. Auf diese Weise kann die hart echtzeitkritische Maschinensteuerungsebene

auf der Soft-SPS abgebildet werden, während die Agentenebene im PC-Betriebssystem in Hochsprachen wie C# oder Java implementiert wird. Die Kommunikation zwischen diesen beiden Ebenen erfolgt über eine spezielle Middleware (Vermittlungsschicht), die eine Schnittstelle zum Schreiben und Lesen von Variablen mit verschiedenen Datentypen bietet [Chi-2010].



**Abbildung 6-16: Dezentrale Steuerung mittels Multiagentensystem nach dem Internet-of-Dinge-Prinzip**

Nachteilig ist der relativ hohe Preis von Embedded PCs zu bewerten. Im Gegenzug kann mit Hilfe dieser Hardwarekomponente und der vorgestellten Zwei-Schichten-Architektur jedoch eine komplett funktionsorientierte Modularisierung auf Fahrzeugebene realisiert werden, d.h. in einem Fahrzeug sind alle zur Ausführung seiner (logistischen) Funktion benötigten Komponenten (Mechanik, Energie, Steuerung [Wil-2006]) gekapselt. Diese vereinfacht die Skalierung eines Zellularen Transportsystems, da neue Fahrzeuge nach dem Plug-and-Play-Prinzip in das System eingebracht oder aus ihm entfernt werden können, ohne dass Anpassungen an einem zentralen Steuerungsprogramm nötig sind.

Allerdings geht diese Reduzierung der Komplexität seitens der Steuerungslogik mit einer Steigerung der Kommunikationskomplexität einher. So ist der Prozess der dezentralen Informationsbeschaffung als sehr komplex einzustufen, da prinzipiell nicht bekannt ist, welcher Teilnehmer über eine bestimmte Information verfügt. Zudem können im Netzwerk verschiedene Versionen derselben Information vorhanden sein.

Der Umstand, dass nun auch komplexe Aufgaben wie die Auftragsdisposition oder das Routing durch das Zusammenspiel der physisch verteilten Softwareagenten gelöst werden müssen, führt zu einem erhöhten Informationsbedarf auf der Fahrzeugebene und somit auch zu einem gesteigerten Kommunikationsaufkommen zwischen den mobilen und stationären Systemteilnehmern.

Durch diese möglichen Probleme ist die Kommunikation in einem nach dem Internet-der-Dinge-Ansatz gesteuerten Materialflusssystem generell als komplexer und schwerer nachvollziehbar einzustufen als in herkömmlichen, zentral gesteuerten Systemen. Da Kommunikationsmechanismen im Gegensatz zur Steuerungslogik jedoch nur ein einziges Mal implementiert werden müssen und anschließend für beliebige Anwendungen wiederverwendet werden können, ist dieser Nachteil tolerierbar. Dennoch entsteht durch diesen Umstand die Anforderung, die Kommunikation zwischen den Softwareagenten möglichst einfach zu gestalten.

Der Datenaustausch zwischen mehreren Einheiten kann prinzipiell nach zwei Mustern erfolgen. Bei der Peer-to-Peer-Kommunikation tauschen die Teilnehmer Informationen über einzelne Nachrichten aus, was voraussetzt, dass der Sender die Empfänger kennt. Daten werden in diesem Fall nur von den einzelnen Softwareagenten gespeichert, was zu einer redundanten Datenhaltung führen kann. Die zweite Möglichkeit ist der Informationsaustausch über einen gemeinsamen Datenspeicher. Dabei werden keine Nachrichten direkt zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht. Als Designgrundlage für derartige Informationsknotenpunkte können sogenannte Blackboardsysteme [Nii-1986, Cor-1991] dienen.

Das entwickelte Kommunikationskonzept sieht eine Mischform der beiden Alternativen vor, welche in Abhängigkeit von der Anzahl der Informationsempfänger (Endpunkte) sowohl die Nutzung eines Blackboardsystems als auch eine direkte Kommunikation nach dem Peer-to-Peer-Prinzip (z.B. Lastwechselkoordination) zulässt. Die für dieses Konzept benötigten Informationsknotenpunkte werden im folgenden Abschnitt anhand einer exemplarischen Implementierung vorgestellt.

Abbildung 6-16 verdeutlicht eine weitere Problemstellung, die mit der Dezentralisierung der Materialflusssteuerung verbunden ist: Eine Schnittstelle zu überlagerten Verwaltungs- und Steuerungsebenen fehlt zunächst. Diese Anbindung an übergeordnete Ebenen kann ebenfalls über das Blackboardsystem realisiert werden. Zudem

umfasst das Internet-der-Dinge-Paradigma neben autonomen Fördertechnikmodulen wie den Fahrzeugen einer Zellularen Fördertechnik auch „intelligente“ Transporteinheiten, die ihre Workflows und somit auch ihre Transportziele selbst verwalten (z.B. durch den Einsatz von RFID-Tags). Stehen derartige Transporteinheiten zur Verfügung und sind deren Informationen den Fahrzeugen mittels entsprechender Lesegeräte zugänglich, so müssen Transportaufträge nicht mehr über höhere Instanzen wie beispielsweise ein Lagerverwaltungssystem eingesteuert werden. Der Datenaustausch mit den übergeordneten Ebenen beschränkt sich in diesem Fall auf Visualisierungs- und Historiendaten (Datalogging).

Auf der technischen Seite greifen für das Kommunikationssystem eines dezentral gesteuerten Fahrzeugkollektivs die in den vorangegangenen Abschnitten 6.2.1 und 6.2.2 getroffenen Entscheidungen hinsichtlich geeigneter Kommunikationstechnologien (WLAN, Bluetooth, ZigBee) und Datenformate (XML / binäre Kodierung). Dieses Kommunikationssystem ermöglicht eine schnelle und sichere Datenübermittlung zwischen sämtlichen Systemteilnehmern (mobil und stationär) und schafft somit die Grundlage zur Selbststeuerung der Fahrzeuge einer Zellularen Fördertechnik.

### **6.3 Zusammenfassung**

In diesem Abschnitt erfolgte zunächst eine Klassifizierung der für den effizienten Betrieb eines autonomen Fahrzeugkollektivs erforderlichen Informationen. Informationen, die nicht von den Fahrzeugen selbst beispielsweise durch Sensoren generiert werden können, müssen über ein Kommunikationssystem an die Fahrzeuge übermittelt werden. Ebenso müssen die Fahrzeuge in der Lage sein, Informationen wie beispielsweise Statusmeldungen zu versenden. Unter Berücksichtigung der verschiedenen relevanten Informationsarten wurde aufbauend auf gängigen Standards, Technologien und Datenformaten ein Kommunikationssystem konzeptioniert.

Geeignete Funktechnologien sind WLAN (IEEE 802.11a/b/g/n), Bluetooth (IEEE 802.15.1) sowie ZigBee (IEEE 802.15.4, für kleine Datenmengen). Abhängig von Datenmenge, Datenstruktur und erforderlicher Übertragungszeit kommen als Datenformate eine binäre Kodierung und das XML-Format zum Einsatz. Beide Datenformate können über ein definiertes Datentelegramm übertragen werden. Die vorge-

stellten Kommunikationskonzepte erfüllen die in Abschnitt 3.2.2 formulierten Anforderungen an ein Kommunikationssystem für Zellulare Transportsysteme.

Zudem wurden bei der Gestaltung des Kommunikationssystems sowohl die Steuerung über eine Leitsteuerung (vgl. FTS, Abschnitt 2.1.2) als auch eine verteilte Steuerung durch ein Multiagentensystem betrachtet. Im letzteren Fall hängt der Kommunikationsaufwand im Funknetz wiederum davon ab, auf welcher Plattform die Softwareagenten ausgeführt werden. So können sämtliche Agenten auf einem einzigen Server laufen oder auf Embedded PCs in den einzelnen Fahrzeugen. Durch diese drei Steuerungsszenarien ergeben sich unterschiedliche Rahmenbedingungen für das jeweilige Kommunikationskonzept, die ebenfalls berücksichtigt sind. So kann die Kommunikationslast in einem agentengesteuerten System durch sogenannte Informationsknotenpunkte (Blackboards) reduziert werden. Die softwaretechnische Umsetzung dieses Konzepts wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.



## 7 Informationsknotenpunkte

Das im vorangegangenen Abschnitt hergeleitete Konzept für Kommunikationsszenario 3 „Dezentrale Steuerung durch verteilte Softwareagenten“ sieht die Verwendung von Informationsknotenpunkten zur Unterstützung eines effizienten Datenaustauschs vor. Nach dem Modell einer Schultafel bzw. eines „schwarzen Bretts“ (Blackboard) dienen diese Informationsknoten als Datenaustauschplattform für die autonom agierenden Fahrzeuge. Durch die Entkopplung von Sender und Empfänger führt dies zu einer Verringerung der Systemkomplexität. Jedes Modul (Fahrzeug) ist für seine eigene Aufgabe und die Beschaffung und Veröffentlichung prozessrelevanter Daten selbst zuständig.

Die Entwicklung und Implementierung der Blackboardfunktionalität stellt eine umfangreiche Aufgabe dar, deren Ergebnisse im folgenden Abschnitt vorgestellt werden. Die Umsetzung der Informationsknotenpunkte erfolgt auf Grundlage der in Abschnitt 6 ausgewählten Technologien, Datenformate und Protokolle. Ein Informationsknotenpunkt ist dabei so zu gestalten, dass er beliebige Daten aufnehmen und bereitstellen kann und Grundfunktionalitäten zur Datenverwaltung bietet. Zusätzlich erfüllt das Blackboard eine Schnittstellenfunktion zu weiteren Systemen, beispielsweise zu einem Lagerverwaltungssystem (LVS). Auf Basis eines ersten Informationsknotenpunktes werden abschließend Konzepte für eine verteilte Blackboardarchitektur erarbeitet. Diese Weiterentwicklung soll Nachteile zentraler Blackboards wie eine mangelnde Robustheit gegenüber Ausfällen (single point of failure) und mögliche Performanceengpässe beseitigen.

### 7.1 Eigenschaften von Blackboardsystemen

Die Bezeichnung Blackboard steht für eine Datenstruktur bzw. ein architektonisches Muster, das von einem Softwaresystem zur Bewältigung von verteilten Problemlöseprozessen verwendet wird und hat seinen Ursprung in der Anwendungsdomäne der Künstlichen Intelligenz [Nii-1986, Cor-1991, Phi-1993, Fat-1994, Cra-1995].

Ein Blackboard-Modell basiert auf einer Analogie zum Kommunikations- und Kooperationsverhalten von Menschen. Dem zugrunde liegt die Vorstellung einer Experten-

gruppe, die kooperativ ein Problem löst, das aufgrund seiner Komplexität durch einen einzelnen Experten nicht zu lösen ist. Während dieses gemeinsamen Problemlösungsprozesses ist es sinnvoll, bestimmte Informationen auf einer Tafel (Blackboard) oder auf Präsentationsfolien bereitzustellen und Zwischenergebnisse festzuhalten. Neu gewonnene und an der Tafel veröffentlichte Zwischenergebnisse können anderen Teilnehmern wiederum als Anregung zur Einbringung der eigenen Expertise dienen. Parallel dazu können einzelne Experten auch untereinander diskutieren, um neue Lösungsansätze zu erarbeiten, die anschließend wieder veröffentlicht werden.

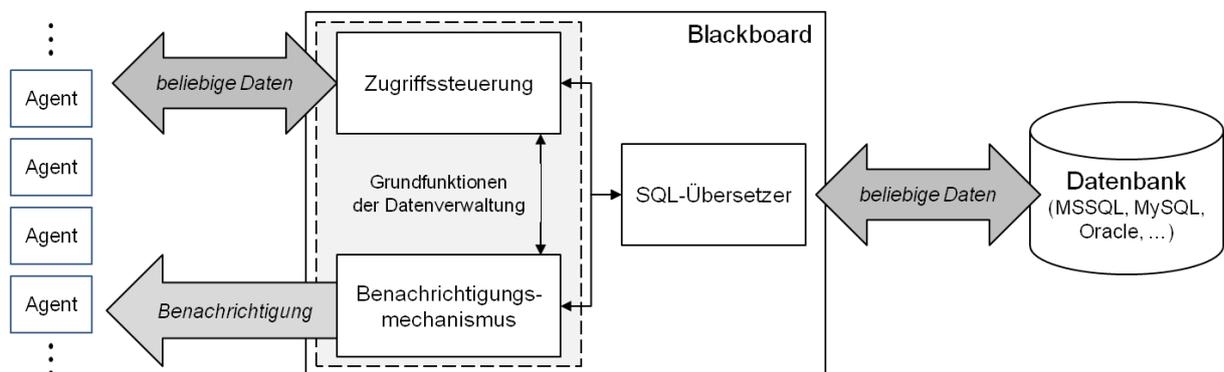
Mit dieser Analogie lässt sich auch die für das Kommunikationskonzept vorgesehene Mischform aus Peer-to-Peer-Kommunikation und dem Informationsaustausch über ein Blackboardsystem begründen, denn die Schlussfolgerung lautet: Für die verteilte Lösung eines Problems (z.B. optimierte Ressourcennutzung in einem Zellularen Transportsystem) empfiehlt sich die Nutzung aller zur Verfügung stehender Kommunikationsmittel und -wege in Abhängigkeit der jeweiligen Anforderungen. So sind die über Peer-to-Peer-Kommunikation ausgetauschten Informationen inhaltlich direkt an die Fähigkeiten der beteiligten Softwareagenten gekoppelt, während ein Blackboard als Speicher für eine Vielzahl verschiedenartiger Daten dient, die es selbst aber nicht interpretieren oder verarbeiten muss. Dies erlaubt eine stark generische Gestaltung des Informationsknotenpunkts, wodurch eine hohe Flexibilität und die Erweiterbarkeit der Kommunikationsinfrastruktur gewahrt bleiben.

Die softwaretechnische Umsetzung des Blackboard-Modells sieht eine Speicherung der von einzelnen Teilprozessen (z.B. Softwareagenten) generierten Daten in einer hierarchisch organisierten Form vor. Das Blackboard ist zudem in der Lage, andere Teilprozesse über die Ablage oder Änderung von Daten zu informieren. Dies ist der Hauptunterschied zwischen einem Blackboardsystem und einer reinen Datenbank, die lediglich von Klienten befragt wird, nicht aber umgekehrt die Klienten aktiviert. Die indirekte Kommunikation der Agenten über das Blackboard ermöglicht zudem eine parallele Abarbeitung von nebenläufigen Prozessen.

Im vorliegenden Anwendungsfall eines Zellularen Transportsystems können die Softwareagenten, die je nach Ausprägung ein Fördertechnikmodul (z.B. Fahrzeug), einen Dienst (z.B. Auftragsagent) oder eine Transporteinheit repräsentieren, das Blackboard nutzen, um Daten zu schreiben, zu lesen und zu löschen. Das Blackboard sorgt auch für eine Erhöhung der Systemtransparenz, indem es zur Nachvoll-

ziehbarkeit des Datenaustauschs beiträgt. So ermöglicht es den Agenten die Formulierung detaillierter Suchanfragen und kann deren Aktivitäten in Form einer Historie aufzeichnen bzw. an einen externen Logging-Dienst weiterleiten.

Darüber hinaus bietet das Blackboard Grundfunktionen der Datenverwaltung, um einen effizienten und sicheren Datenaustausch zu gewährleisten (Abbildung 7-1). So muss eine Logik zur Zugriffssteuerung implementiert werden, die gleichzeitige Schreibzugriffe verhindert und die Konsistenz der vom Blackboard gespeicherten Daten gewährleistet. Um andere Teilprozesse/Softwareagenten über die Ablage oder Änderung von Daten zu informieren, ist zudem ein Benachrichtigungsmechanismus einzurichten. Dieser teilt interessierten Agenten automatisch mit, dass bestimmte Dateninhalte, für welche sie zuvor ein Abonnement eingerichtet haben, verändert wurden. Ist das Blackboard mit einem Datenbanksystem verbunden, um für die Persistenz systemrelevanter Informationen zu sorgen, so wird zusätzlich eine Übersetzungsfunktionalität benötigt, die die (beliebigen) Dateninhalte in SQL-Befehle einbindet und auf diese Weise übermittelt bzw. abfragt.



**Abbildung 7-1: Funktionen und Komponenten des Blackboardsystems**

Tabelle 7-1 stellt die funktionalen Eigenschaften der Blackboard-Kommunikation jenen der Peer-to-Peer-Kommunikation gegenüber und zeigt auf diese Weise Vor- und Nachteile der beiden Modelle auf. Da das vorliegende Kommunikationskonzept auf einer Mischform beider Kommunikationsformen basiert, kann aus den aufgelisteten Eigenschaften die jeweils geeignete Lösung für die Agentenkommunikation in Abhängigkeit vom Kommunikationsgegenstand abgeleitet werden.

Tabelle 7-1: Gegenüberstellung funktionaler Aspekte der (Single-)Blackboard- und Peer-to-Peer-Kommunikation (in Anlehnung an [Chi-2010, S. 67])

	Single Blackboard System (BB <sub>1</sub> )	Peer-to-Peer (P2P)
Auffinden relevanter Kommunikationspartner	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine direkte Kommunikation, sondern nur mit BB</li> <li>• Keine Suche nach Kommunikationspartnern</li> <li>• Eigenverantwortung der Agenten für Veröffentlichung / Beschaffung relevanter Informationen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suche nach konkreten Kommunikationspartnern / Kontaktaufnahme</li> <li>• Nutzung eines Verzeichnisdienstes oder Fluten des Netzwerks mit entsprechender Anfrage</li> </ul>
Datenkonsistenz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewährleistung der Datenkonsistenz auf BB durch Zugriffssteuerung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gefahr von Inkonsistenzen durch hochgradige Verteilung und hohe Anzahl von Kopien der Datensätze</li> <li>• Gewährleistung der Datenkonsistenz durch Mechanismen zum Aufspüren/Auflösen der Inkonsistenzen</li> </ul>
Datenredundanz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einzige vertrauenswürdige Kopie aller Systeminformationen auf BB</li> <li>• BB als kritischer single point of failure (SPOF)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Replikation der Informationen durch einzelne Einheiten (theoretisch beliebig oft → speicherplatzabhängig)</li> <li>• Hohe Robustheit im P2P-Netz gegenüber Ausfällen</li> </ul>
Zentrale Datenverfügbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• BB als zentraler Datenspeicher für Gesamtsystem</li> <li>• Verfügbarkeit sämtlicher Daten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Datenakquise durch Fluten des gesamten Netzwerkes (Broadcast)</li> </ul>
Aufzeichnung von Historien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protokollierung aller Lese-, Schreib-, Löschoptionen durch BB oder externen (Service-)Agenten möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lokale Protokolle einzelner Agenten</li> <li>• Nachverfolgung globaler Zusammenhänge durch Zusammenführung / Synchronisation lokaler Historien</li> </ul>

In Abschnitt 7.3 wird schließlich noch der Parallelbetrieb mehrerer Blackboards (BB<sub>d</sub>, Distributed Blackboard System<sup>18</sup>) zum Zweck der Performanz- und Robustheitssteigerung untersucht. Zunächst beschreibt der folgende Abschnitt aber die Implementierung eines ersten Informationsknotenpunkts und die dabei gewonnenen Erkenntnisse.

### 7.2 Implementierung des Blackboardsystems

Das Blackboardsystem wurde in der Entwicklungsumgebung Microsoft Visual Studio 2008 in der Programmiersprache C# umgesetzt, greift aber auch auf Bibliotheken des Java Agent Development (JADE) Frameworks zu [Bel-2007]. Das Blackboard selbst ist als Softwareagent nach dem JADE-Framework ausgeführt, wodurch es sich einfach in ein Multiagentensystem integrieren lässt. Die Agentenkommunikation und somit die Erreichbarkeit des Blackboards durch die anderen Teilnehmer (z.B. Fahrzeugagenten) setzt einheitliche Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle voraus. Eine gute Basis bieten in diesem Zusammenhang die Standards der Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) [FIPA-2009], die für verschiedene Aspekte der Agentenmodellierung, -kommunikation und -interaktion gelten. Das JADE-Framework ist zur Erstellung FIPA-konformer Agentensysteme geeignet. Ontologien, Architekturstandards und Softwareagenten nach der FIPA-Spezifikation wurden auch in eigenen Vorarbeiten der Forschungsstellen wie dem BMBF-Projekt „Internet der Dinge“ [Gün-2010, Chi-2010] erfolgreich eingesetzt und genügen nach [Lib-2011] den Anforderungen an eine agentenbasierte Gestaltung der Materialflusssteuerung. Trotz der Anlehnung an FIPA-Standards sind die Kommunikations- und Kooperationsverfahren allgemein gehalten, um eine Übertragbarkeit und generelle Realisierbarkeit der erarbeiteten Konzepte sicherzustellen. Im Folgenden werden die implementierten Zugriffs- und Benachrichtigungsmechanismen des Blackboards sowie eine zusätzliche Schnittstellenfunktion zu weiteren Systemen wie einem Lagerverwaltungssystem (LVS) vorgestellt.

---

<sup>18</sup> Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird im Folgenden zwischen Kommunikationssystemen mit einem einzigen Blackboard als Informationsknotenpunkt (BB<sub>1</sub>, Single Blackboard System) und verteilten Blackboardsystemen mit dezentralisierten Informationsknotenpunkten (BB<sub>d</sub>, Distributed Blackboard System) unterschieden.

## Zugriffssteuerung

Um Dateninkonsistenzen durch gleichzeitige Schreibzugriffe auf das Blackboard zu vermeiden, müssen die einzelnen Softwareagenten bei Bedarf exklusive Schreibrechte erhalten. Dies kann prinzipiell durch ein Token-Verfahren oder über Sperrungen von Blackboardsektionen erreicht werden [Chi-2010]. Ein Token-Verfahren kommt aufgrund zusätzlicher, nicht operativer Token-Durchlaufzeiten und des damit verbundenen Verwaltungsaufwands für ein Kommunikationssystem der Zellularen Fördertechnik nicht in Betracht. Daher werden den Agenten bei Bedarf exklusive Schreibrechte durch Sperrungen, die sich auf bestimmte Dateninhalte des Blackboards beziehen, garantiert. Die Verwaltung und Zuteilung der Schreibrechte erfolgt ebenso durch das Blackboard selbst wie die Sperrung der betroffenen Bereiche für Zugriffe durch andere Agenten. In Abbildung 7-2 ist die Zugriffssteuerung über Sperrungen schematisch dargestellt. Dabei sind die aktuell mit dem Blackboard kommunizierenden Agenten sowie die gesperrten Daten grau hinterlegt. Die Nummern der gesperrten Daten entsprechen der ID des Agenten, der momentan die Schreibrechte besitzt.

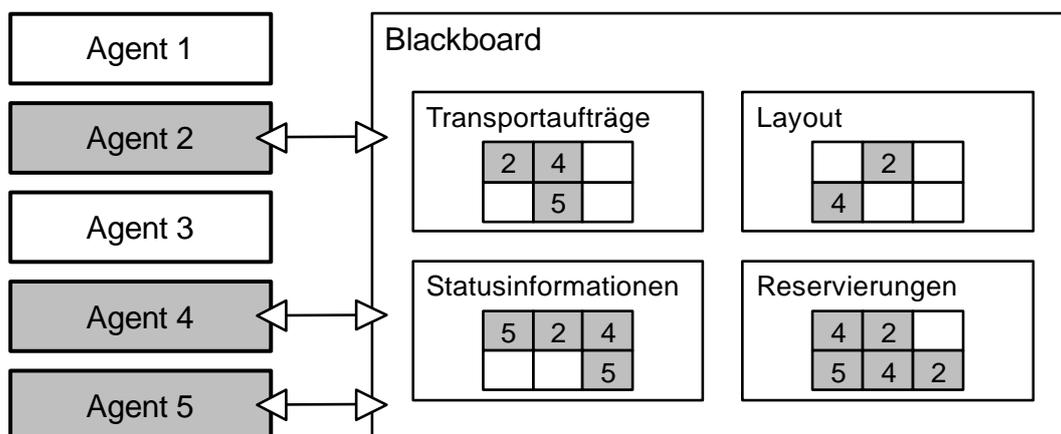
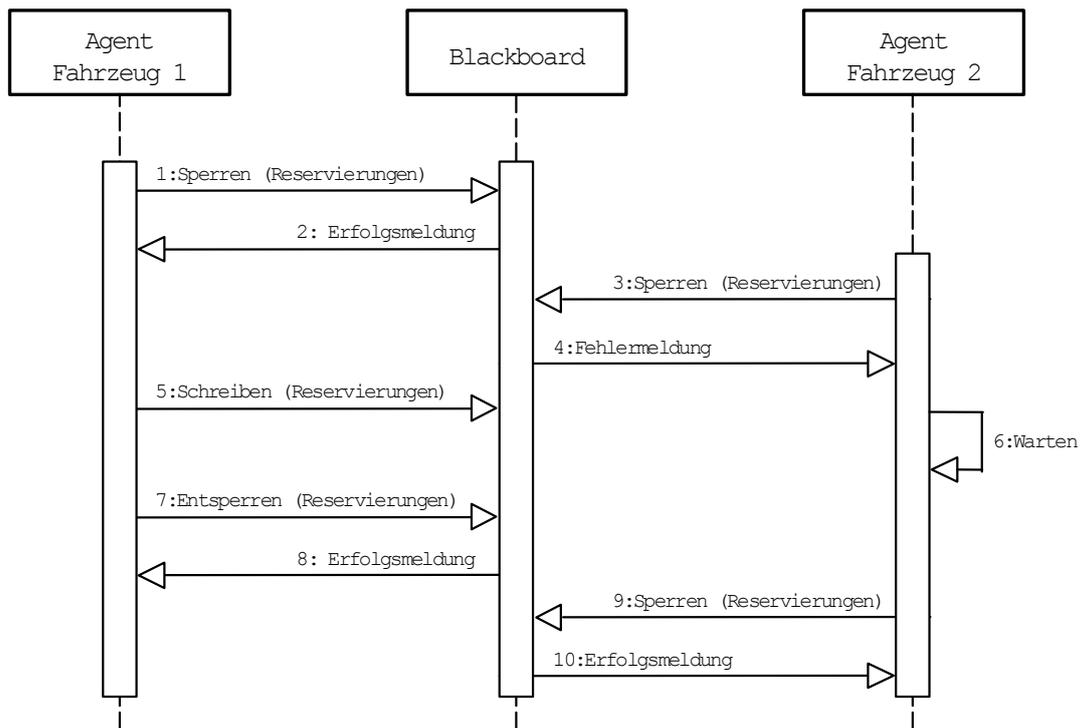


Abbildung 7-2: Zugriffssteuerung über Sperrungen

Die Sperrung der Bereiche endet mit der Freigabe durch den entsprechenden Agenten oder nach einer vorgegebenen Frist. Für Daten, bei denen gleichzeitige Zugriffe aufgrund der Systemlogik ausgeschlossen sind (z.B. fahrzeugspezifische Statusinformationen), können Schreib- und Lesevorgänge komplett ohne Sperrung durchgeführt werden, was den Kommunikationsaufwand wiederum reduziert. Abbildung 7-3 zeigt die Funktionsweise des umgesetzten Verfahrens zur Zugriffssteuerung anhand eines UML-Sequenzdiagramms.

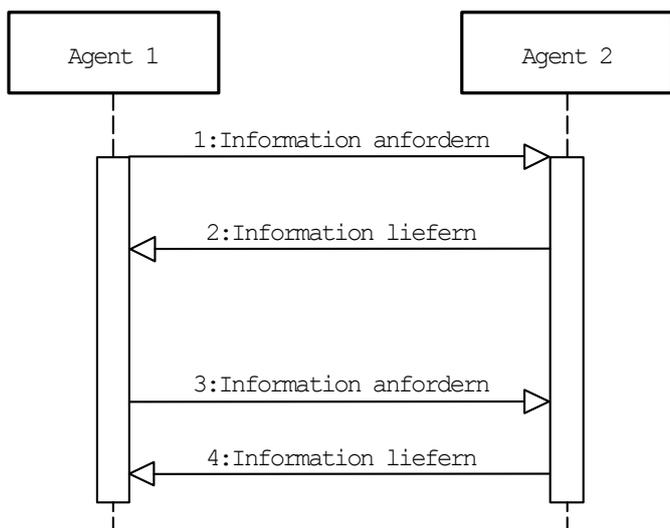


**Abbildung 7-3: UML-Sequenzdiagramm der umgesetzten Zugriffssteuerung**

Ergänzt wird die Zugriffssteuerung durch das in fast allen Datenbanksystemen genutzte Transaktionskonzept. Dieses Konzept sorgt dafür, dass einzelne oder mehrere Datenbankzugriffe entweder vollständig oder gar nicht abgearbeitet werden. Besteht eine Transaktion beispielsweise aus einer Schreib- und einer Leseaktion, so wird bei einer fehlerhaften Verarbeitung des Lesebefehls auch die vorangegangene Schreibaktion rückgängig gemacht. Erst nach dem erfolgreichen Abschluss sämtlicher Schritte einer Transaktion werden Änderungen in der Datenbank fest gespeichert. Das Blackboard nutzt diesen Mechanismus, um fehlerhafte Nachrichten von Seiten der Softwareagenten abzufangen.

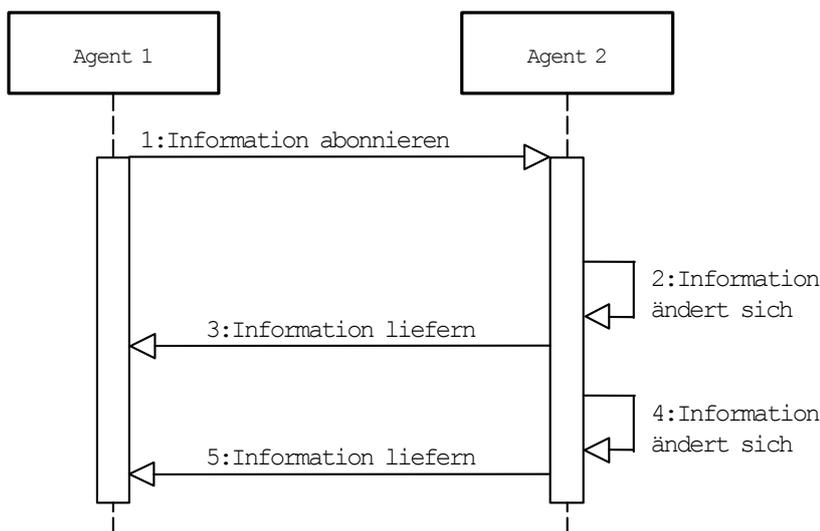
### Benachrichtigungsmechanismus

Die Beschaffung prozessrelevanter Informationen kann prinzipiell auf zwei Arten erfolgen, egal ob die Agenten Peer-to-Peer- oder Blackboard-Kommunikation nutzen. Entweder fragt ein Softwareagent eine Information bei einem anderen Agenten an und erhält anschließend die benötigte Antwort oder eine Fehlermeldung. Dieses Vorgehen wird als Pull-Prinzip bezeichnet und ist in Abbildung 7-4 in Form eines UML-Sequenzdiagramms dargestellt.



**Abbildung 7-4: Informationsbeschaffung über direktes Anfragen (Pull-Prinzip)**

Alternativ können von einem Agenten mittels Abonnements ereignisgesteuerte Benachrichtigungen (z.B. Meldung bei Änderungen in einem bestimmten Datensatz) bei anderen Agenten angefordert werden. Nach dem einmaligen Anlegen eines derartigen Abonnements sind für den Softwareagenten somit keine weiteren Anfragen mehr nötig, um die gewünschten Informationen zu erhalten. Abonnements funktionieren somit nach dem Push-Prinzip. Abbildung 7-5 zeigt das entsprechende UML-Sequenzdiagramm.

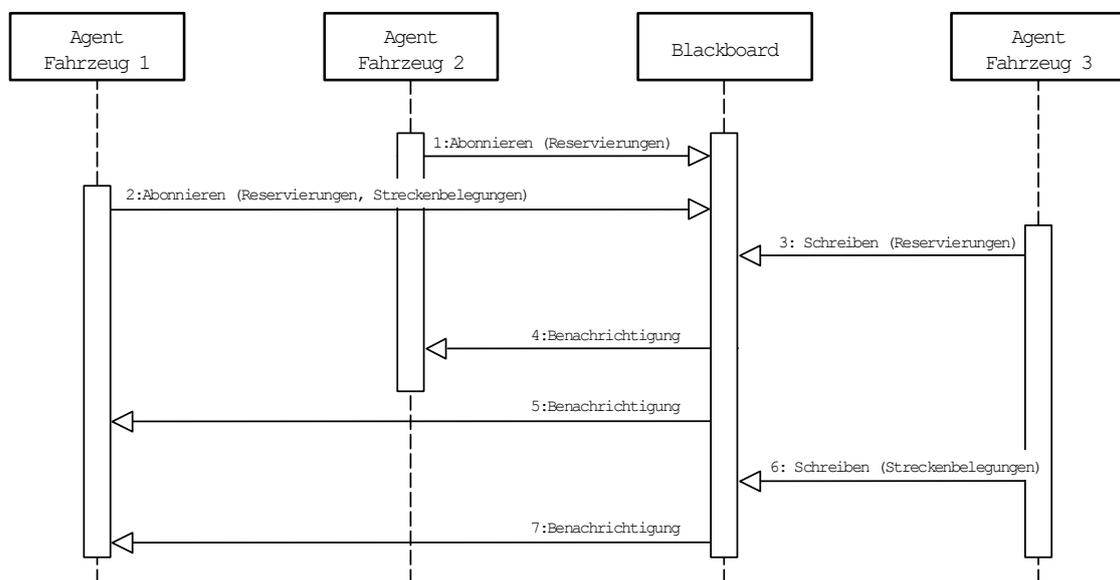


**Abbildung 7-5: Informationsbeschaffung über Abonnements (Push-Prinzip)**

Ein Vergleich zwischen den beiden Sequenzdiagrammen macht deutlich, dass der Datenaustausch nach dem Push-Prinzip nach Abschluss des Abonnements nur noch jeweils halb so viele Nachrichten benötigt wie das Pull-Prinzip. Geht man davon aus, dass nach dem Pull-Prinzip auch überflüssige Nachrichten ausgetauscht werden, z.B.

bei wiederholter Anfrage derselben Information, ohne dass sich diese in der Zwischenzeit geändert hat, so ergibt sich für dieses Verfahren eine noch schlechtere Kommunikationseffizienz. Die Einsatzmöglichkeiten des effizienteren Push-Prinzips sind allerdings durch einige Restriktionen beschränkt.

So darf sich der Informationsbedarf des Empfängers über längere Zeiträume nicht ändern, da ansonsten das häufige Anlegen und Kündigen von Abonnements die Einsparung der Anfragen im Vergleich zum Pull-Prinzip aufwiegt und die Kommunikationseffizienz stark reduziert. Auch darf sich die abonnierte Information nicht bedeutend häufiger ändern, als der Empfänger diese nutzt, da ansonsten viele irrelevante Nachrichten übermittelt werden. Die Festlegung eines minimalen Zeitintervalls zwischen zwei Benachrichtigungen kann dieser Problematik entgegenwirken. Ein Kommunikationssystem für die Zellulare Fördertechnik ermöglicht den beteiligten Softwareagenten beide vorgestellten Möglichkeiten zur Abwicklung des Datenaustauschs. Dementsprechend ist der Benachrichtigungsmechanismus nach dem Push-Prinzip auch im implementierten Blackboardsystem nutzbar und hilft, den Kommunikationsaufwand zu reduzieren (Abbildung 7-6).

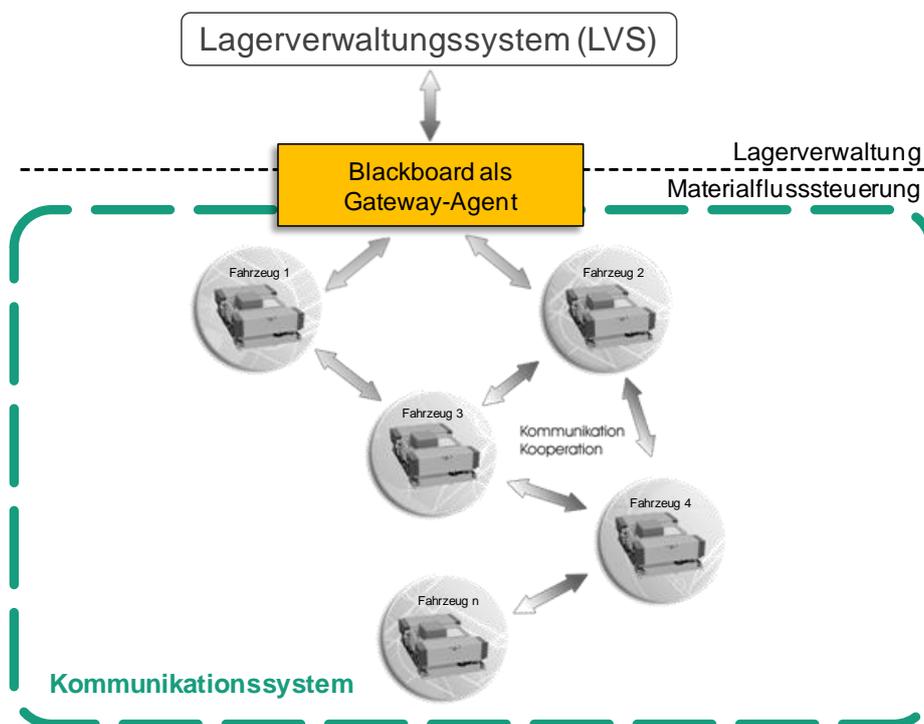


**Abbildung 7-6: UML-Sequenzdiagramm des umgesetzten Benachrichtigungsmechanismus**

Neben einer Minimierung des Kommunikationsaufwands ist unter Berücksichtigung der Anforderung  $A1_K$  – *Bedarfsgerechte Bereitsstellung benötigter Daten* immer auch die Einhaltung von zeitlichen und qualitativen Vorgaben beim Austausch einzelner Informationsarten ein wichtiges Kriterium für die jeweilige Entscheidung zwischen Pull- und Push-Prinzip.

### Schnittstellenfunktion zu weiteren Systemen

Der implementierte Informationsknotenpunkt bietet den Agenten, die einzelnen Fahrzeugen, Softwarediensten oder auch Transporteinheiten zugeordnet sind, die Möglichkeit, Daten zu veröffentlichen, einzusehen und zu ändern und leistet so einen Beitrag zur Kommunikation und Kooperation in Zellularen Transportsystemen. In Abschnitt 6.2.3 wird für das dritte Kommunikationskonzept „Dezentrale Steuerung durch verteilte Softwareagenten“ auf die fehlende Anbindung des Kommunikationssystems an übergeordnete Systeme wie ein Lagerverwaltungssystem (LVS) oder ein ERP-System hingewiesen. Diese Schnittstellenfunktion kann das Blackboardsystem erbringen, indem es als „Gateway“ den bidirektionalen Datenaustausch (z.B. Transportaufträge, Visualisierungsdaten) über die Systemgrenzen hinweg ermöglicht (Abbildung 7-7).



**Abbildung 7-7: Das Blackboard als Schnittstelle zu übergeordneten Systemen**

Die Bezeichnung „Gateway“ ist hierbei nicht im strengen informationstechnischen Sinne zu verstehen, sondern beschreibt lediglich die Umsetzung von Informationen eines geschlossenen Netzwerks (Zellulares Transportsystem) in ein anderes, übergeordnetes Netzwerk. Dabei abstrahiert das Blackboard die jeweiligen, meist herstellereinspezifischen Schnittstellen und kann zusätzlich die einzelnen Anfragen bzw. Datenzugriffe nach verschiedenen Kriterien priorisieren. Da die übergeordneten Sys-

teme in großem Umfang auf Datenbanken basieren, kann dabei auch der SQL-Übersetzer des Blackboards genutzt werden, um Anfragen von Agenten aus einer Internet-der-Dinge-Ontologie in die jeweilige SQL-Syntax zu übertragen und auch die Antworten vom Datenbanksystem als mit der Ontologie konforme Nachrichten zu übermitteln.

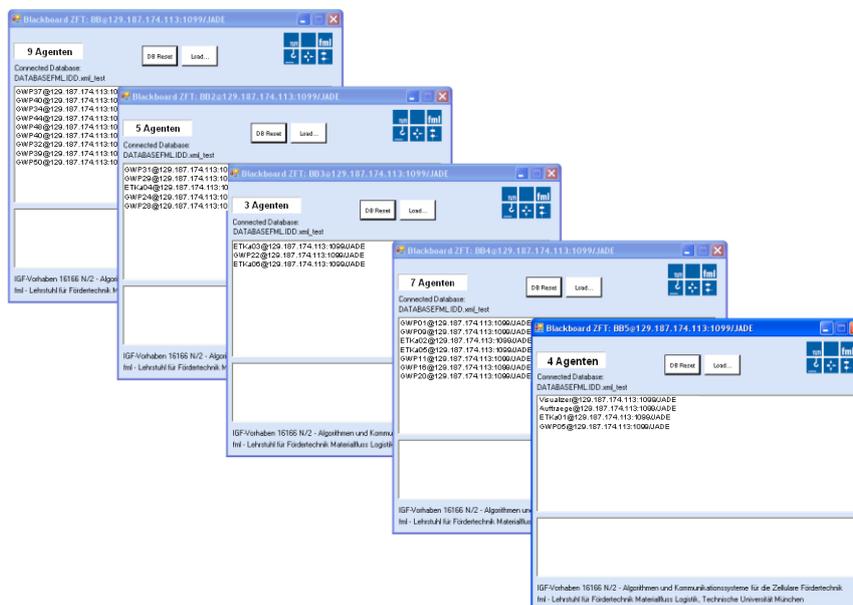
### **7.3 Dezentralisierung durch den Parallelbetrieb mehrerer Blackboards**

Da das Blackboard, wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt, eine wichtige Funktion im entwickelten Kommunikationssystem einer Zellularen Fördertechnik übernimmt, ist ein Ausfall dieser Komponente mit hohen Risiken verbunden. Da sicherheitskritische Regelkreise innerhalb der Fahrzeuge überwacht werden, besteht zwar auch in diesem Fall keine unmittelbare Unfall- oder Kollisionsgefahr, jedoch kann der Blackboard-Ausfall bis zu einem Stillstand des Fahrzeugkollektivs aufgrund fehlender Informationen auf der Ebene der steuernden Agenten führen. Ist das Blackboard einfach ausgeführt (BB<sub>1</sub>, Single Blackboard System), so stellt es für das Kommunikationssystem einen single point of failure dar [Fuj-2000]. Zudem kann ein Single Blackboard System zum Engpass bei der Datenübertragung werden, wenn die Kommunikationslast aufgrund von Durchsatzspitzen stark steigt und die Leistungsfähigkeit der Blackboard-Plattform nicht ausreicht, um alle parallelen Anfragen zu verarbeiten.

Es sind daher entsprechende Maßnahmen vorzusehen, um diesen beiden Schwachpunkten zu begegnen. Im Falle eines Blackboard-Ausfalls könnte ein ausschließlicher Datenaustausch nach dem Peer-to-Peer-Prinzip als Rückfallsystem genutzt werden. Dafür müssten die Kommunikationspartner den Ausfall automatisch erkennen und für alle bisher via Blackboard veröffentlichten und abgerufenen Informationen auf das alternative Kommunikationsmodell umschalten. Wie weiter oben aber bereits festgestellt wurde, führt die reine Peer-to-Peer-Kommunikation zu einem enormen Anstieg der Kommunikationslast, was sich negativ auf die Leistung des Gesamtsystems auswirken kann. Zudem kann der Ausfall des Blackboards auch den Datenaustausch mit übergeordneten Ebenen zum Erliegen bringen, die nicht über Peer-to-Peer-Kommunikation erreicht werden können. Somit kommt diese Maßnahme nur für eine Überbrückung der Störung für eine kurze Zeitspanne in Frage, nach der das Blackboard wieder zur Verfügung stehen muss.

## 7 Informationsknotenpunkte

Ein zweiter Ansatz zur Steigerung der Robustheit ist der parallele Betrieb mehrerer Blackboards, wodurch der Ausfall einzelner Blackboards kompensiert werden kann. Dieser Ansatz findet sich auch bei Hochverfügbarkeitslösungen für Datenbanksysteme wieder. Auch bei dieser Alternative müssen ausgefallene Informationsknotenpunkte wieder instandgesetzt werden, um die ursprünglich kalkulierte Zuverlässigkeit aufrecht zu erhalten. Allerdings können die Systeme so skaliert werden, dass der Ausfall eines einzelnen Blackboards zunächst zu keinerlei Leistungseinbußen führt. Handelt es sich bei dem aufgetretenen Fehler um einen Absturz des Blackboard-Agenten, besteht zusätzlich die Möglichkeit, dass die verbliebenen Blackboards einen Neustart des ausgefallenen Informationsknotenpunkts initiieren und sich das System somit selbst „heilt“. Aufgrund dieser Eigenschaften ist der Parallelbetrieb mehrerer Informationsknotenpunkte als geeigneter Ansatz zur Steigerung der Zuverlässigkeit und Robustheit der Blackboard-Kommunikation zu werten und wurde im Rahmen des Forschungsprojekts, das diesem Bericht zugrunde liegt, softwaretechnisch umgesetzt (Abbildung 7-8).



**Abbildung 7-8: Grafische Oberfläche eines verteilten Blackboardsystems (BB<sub>n</sub>) bestehend aus fünf Informationsknotenpunkten**

Als zweiter Schwachpunkt eines Single Blackboard Systems (BB<sub>1</sub>) wurde die Engpass- oder Bottleneck-Problematik bei der Vermittlung und Verwaltung umfangreicher Daten ausgemacht. Dem könnte durch die Verwendung einer leistungsfähigeren Blackboard-Plattform begegnet werden, wodurch allerdings die Hardwarekosten

steigen. Zudem bleibt durch diese Maßnahme das single-point-of-failure-Problem ungelöst. Ein besserer Ansatz ist in diesem Fall wiederum die Verteilung der Blackboard-Funktionalität auf mehrere parallel laufende Informationsknotenpunkte in Kombination mit einer räumlichen und/oder funktionalen Spezialisierung der einzelnen Informationsknotenpunkte. Auf diese Weise lässt sich das Datenvolumen pro Blackboard reduzieren. Zudem können lokale Überlasten durch eine Umverteilung innerhalb des Distributed Blackboard Systems ( $BB_d$ ) ausgeglichen werden.

Die Erweiterung des Blackboardsystems um weitere Informationsknotenpunkte lässt sich aufgrund der zugrunde liegenden Objektorientierten Programmierung (OOP) sowie der Ausführung als Softwareagenten nach der FIPA-Spezifikation mit sehr geringem Aufwand erreichen. Es müssen lediglich weitere Instanzen der Klasse „Blackboard“ mit eindeutigen Namen gestartet werden. Dies geschieht über eine Ergänzung in einer Konfigurationsdatei:

```
agents = BB:Blackboard.ABlackboard; BB2:Blackboard.ABlackboard
```

Nach diesem Schritt sind mehrere Blackboards im Multiagentensystem verfügbar, die allerdings noch nicht miteinander zu einem verteilten Blackboardsystem ( $BB_d$ ) verbunden sind und daher weder den Ausfall einzelner Blackboards erkennen und kompensieren noch die Kommunikationslast untereinander aufteilen können. Die folgenden Abschnitte zeigen die notwendigen Mechanismen zur Umsetzung eines verteilten Blackboardsystems und zur Spezialisierung einzelner Informationsknotenpunkte.

### **Failover-Mechanismus für parallel betriebene Blackboards**

Eine verteilte Blackboard-Architektur benötigt zusätzliche Funktionen zur Synchronisation der einzelnen Informationsknotenpunkte, um eine systemweite Datenkonsistenz zu gewährleisten. Als Grundlage für die Entwicklung solcher Methoden dienen in Datenbanksystemen wie ORACLE oder mySQL eingesetzte Mechanismen. Parallelen finden sich beispielsweise zwischen dem angestrebten verteilten Blackboardsystem ( $BB_d$ ) und einem MySQL-Cluster [MYS-2007]. Ein solches Cluster weist die folgenden Eigenschaften auf:

- Höchste Anforderungen an Durchsatz und Antwortzeit
- Automatisches Failover (Wechsel zwischen Netzwerkdiensten im Störfall)
- Transaktionen und In-Memory-Datenspeicherung ohne spezielle Netzwerk-, Hardware- oder Speichervoraussetzungen

- Hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit, da singuläre Fehlerquellen vermieden werden
- Ausführung als Shared-Nothing-, synchroner Datenbankcluster<sup>19</sup>

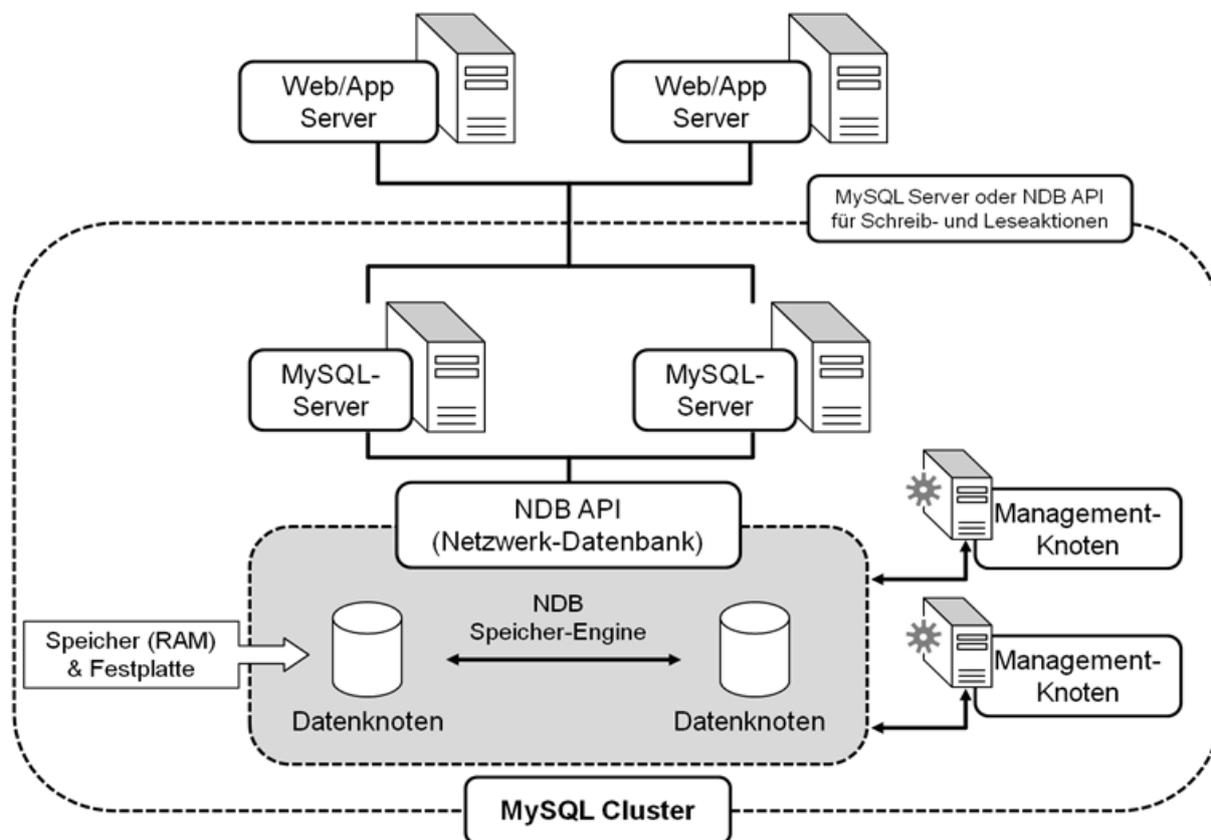
Diese Eigenschaften machen das System extrem fehlertolerant. Jeder Knoten kann ausfallen, ohne dass das System als Ganzes beeinflusst wird, d.h. eine Anwendung kann mit der Ausführung von Transaktionen fortfahren, auch wenn ein Datenknoten versagt. Zudem ist die Verarbeitung zehntausender, über mehrere Datenknoten verteilter Transaktionen pro Sekunde möglich [MYS-2007]. Die Hauptkomponenten eines MySQL-Clusters sind [MYS-2007]:

- **Datenknoten**
  - Speicherort sämtlicher Daten
  - Replizierung der Daten zwischen den Knoten zur Sicherstellung der Verfügbarkeit auch bei Ausfall eines oder mehrerer Knoten
  - Verwaltung aller Datenbanktransaktionen
- **Management-Knoten**
  - Abwicklung der Clusterkonfiguration
  - Einsatz lediglich bei Inbetriebnahme von Knoten und Rekonfigurationen des Systems
  - Status des Management-Knoten ansonsten ohne Einfluss auf die Verfügbarkeit des Clusters
  - Erhöhung der Fehlertoleranz durch den Einsatz mehrerer Management-Knoten möglich
- **MySQL-Knoten**
  - Ausführung als MySQL-Server
  - Sicherstellung des Zugriffs auf die geclusterten Datenknoten
  - Nutzung der SQL-Schnittstelle
  - Interaktion mit dem Cluster ohne speziell programmierte Anwendung

---

<sup>19</sup> Bei einer Shared-Nothing-Architektur (SN) kann jeder Knoten unabhängig und eigenständig seine Aufgaben mit seinem eigenen Prozessor und den zugeordneten Speicherkomponenten (z.B. Festplatte, Hauptspeicher) erfüllen und kein bestimmter, einzelner Knoten ist für die Verbindung zu einer Datenbank notwendig. Die Knoten sind über ein LAN- oder WAN-Netzwerk miteinander verbunden. Jeder Knoten verfügt über eine Kopie des Datenbank-Management-Systems und kann Aufgaben an andere, nicht ausgelastete Knoten weitergeben.

Abbildung 7-9 stellt eine beispielhafte MySQL-Cluster-Architektur dar, welche ein Mindestmaß an Redundanz für alle MySQL-Komponenten durch eine jeweils doppelte Ausführung bietet (2 Datenknoten, 2 Management-Knoten, 2 MySQL-Knoten).



**Abbildung 7-9: Beispielhafte MySQL-Cluster-Architektur mit einem Mindestmaß an Redundanz für alle MySQL-Komponenten [MYS-2007]**

Für eine redundante Verteilung der im Cluster gespeicherten Daten werden diese zunächst in Fragmente zerteilt. Diese Datenfragmente werden anschließend in zuvor spezifizierter Anzahl über die verfügbaren Datenknoten repliziert. Abbildung 7-10 zeigt beispielhaft ein MySQL-Cluster mit vier Datenfragmenten, die wiederum über vier verfügbare Datenknoten repliziert und verteilt sind. Jedes Datenfragment wird zweimal repliziert und ist somit als primäres und sekundäres Datenfragment im Cluster vorhanden. Die Datenknoten, welche die jeweils komplementären Replikate enthalten, bilden eine Knotengruppe.

ID	Hauptstadt	Land	UTC*
1	Kopenhagen	Dänemark	2
2	Berlin	Deutschland	2
3	New York City	USA	-5
4	Tokio	Japan	9
5	Athen	Griechenland	2
6	Moskau	Russland	4
7	Oslo	Norwegen	2
8	Peking	China	8

\*Coordinated Universal Time

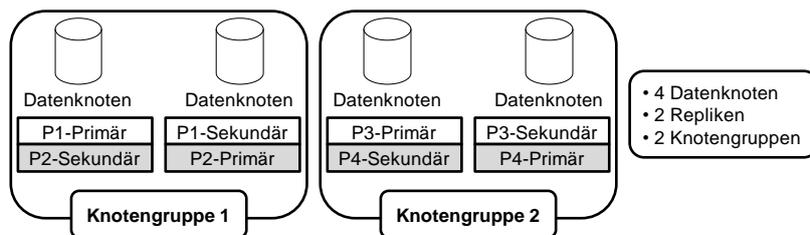


Abbildung 7-10: Beispielhaftes MySQL-Cluster [MYS-2007]

Fällt nun in diesem MySQL-Cluster sowohl in Knotengruppe 1 als auch in Knotengruppe 2 jeweils ein Datenknoten aus, so sind die Daten dennoch für die Anwendung weiterhin verfügbar (vgl. Abbildung 7-11).

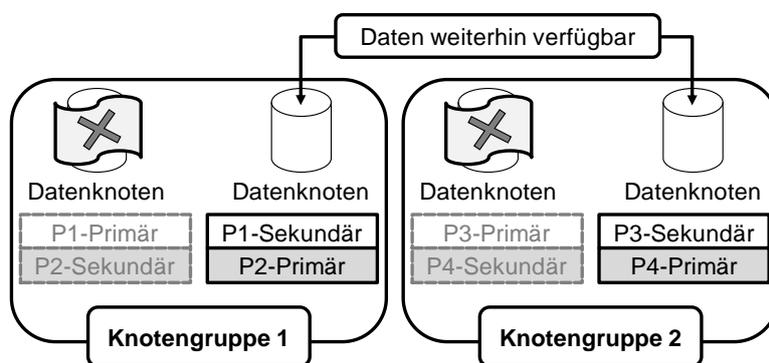
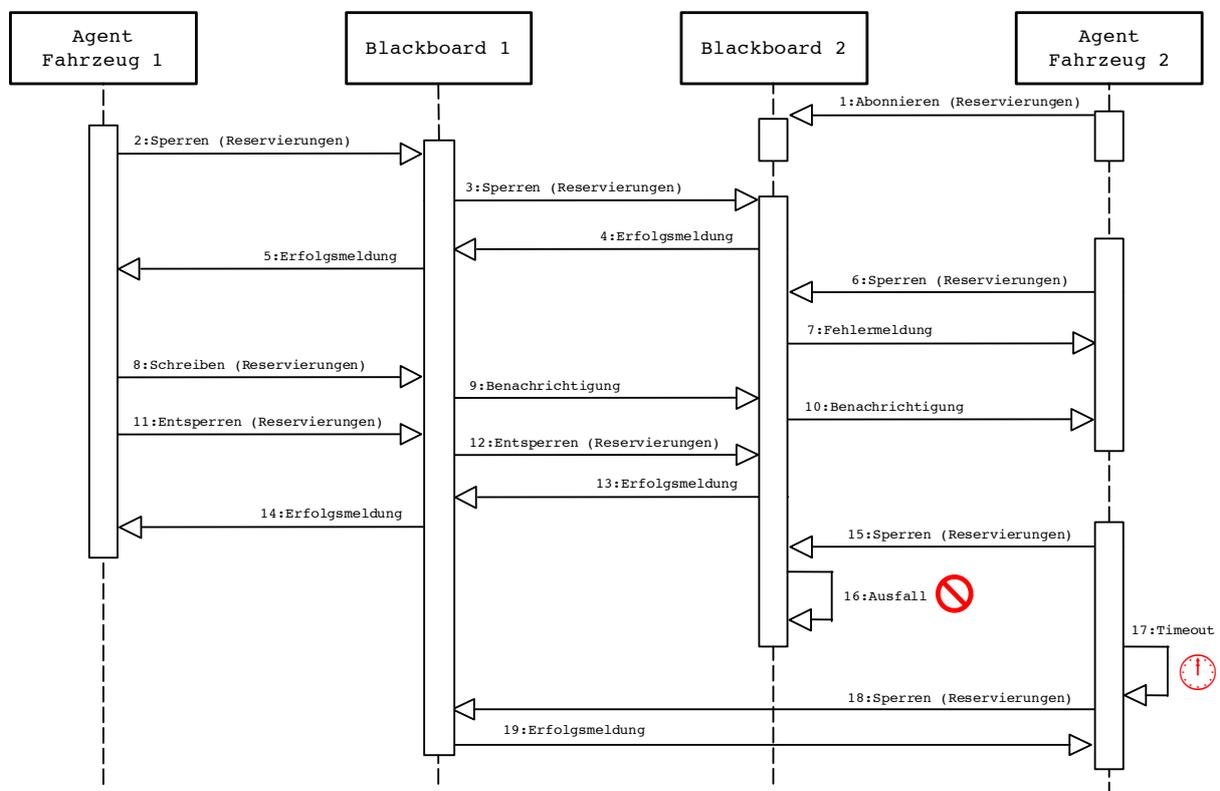


Abbildung 7-11: Komplette Datenverfügbarkeit trotz des Ausfalls von Datenknoten in beiden Knotengruppen [MYS-2007]

Ein ähnlicher Ansatz lässt sich in einem verteilten Blackboardsystem realisieren, wenn jeweils mindestens zwei Informationsknotenpunkte ihre Daten teilen. Bei der Verwaltung der Speicherorte einer Datei innerhalb des Blackboardsystems kann die Datenstruktur einer verteilten Hashtabelle (engl.: distributed hash table (DHT)) zum Einsatz kommen [Urd-2011]. Die Daten werden bei diesem Ansatz gleichmäßig über die Informationsknotenpunkte verteilt. Diese selbstorganisierende Datenstruktur kann den Ausfall, Beitritt und Austritt von Knoten abbilden und ergänzt so das Konzept eines verteilten Blackboardsystems (BB<sub>d</sub>).

### 7.3 Dezentralisierung durch den Parallelbetrieb mehrerer Blackboards

Ist das Blackboard an ein externes Datenbanksystem angebunden, so kann die Datenkonsistenz und -verfügbarkeit durch deren Mechanismen (z.B. MySQL-Cluster) sichergestellt werden. Das Blackboardsystem muss dann lediglich den Zugang zum Datenbanksystem auch bei einem Ausfall einzelner Informationsknotenpunkte garantieren können. Ein Vorgehen zur automatischen Erkennung von Blackboard-Ausfällen ist in Abbildung 7-12 in Form eines UML-Sequenzdiagramms dargestellt. Fahrzeugagent 2 erkennt am Ausbleiben einer Erfolgsmeldung durch Blackboard 2 einen möglichen Ausfall und meldet sich nach einer vordefinierten Zeitspanne bei einem anderen Blackboard an, um seine Kommunikationsfähigkeit aufrecht zu halten.



**Abbildung 7-12: Fehlererkennung bei parallel betriebenen Blackboards**

Wie weiter oben angesprochen reicht die reine Erkennung eines Blackboard-Ausfalls allerdings noch nicht aus, um das System robust zu gestalten. Vielmehr muss nach einem erkannten Ausfall die ursprüngliche Systemleistung und -verfügbarkeit durch den Neustart eines Blackboard-Agenten wiederhergestellt werden. Abbildung 7-13 zeigt ein entsprechendes Vorgehen auf Basis einer Ringtopologie zwischen den Blackboards, welches im Rahmen des Forschungsprojekts umgesetzt wurde.

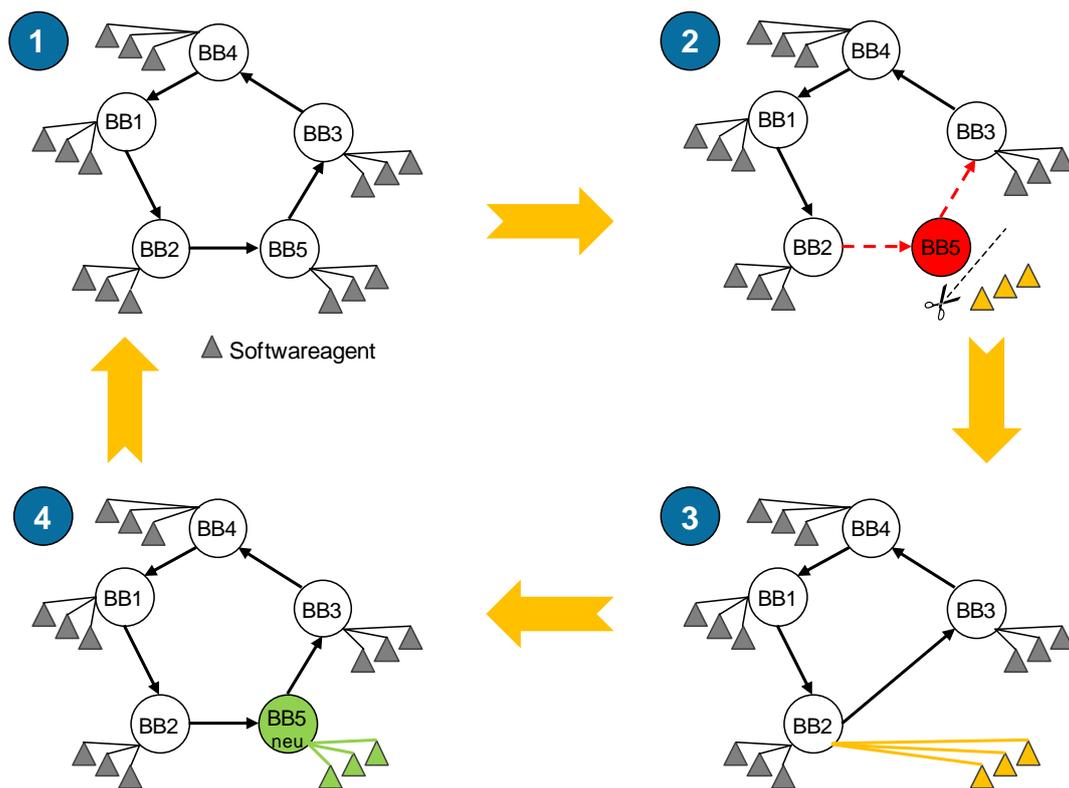


Abbildung 7-13: Failover-Mechanismus im Distributed Blackboard System (BB<sub>n</sub>)

Das Vorgehen lässt sich in folgende vier Schritte gliedern:

1. In der Initialisierungsphase verbinden sich die Blackboards auf Basis eines für diesen Zweck entwickelten Algorithmus zu einer logischen Ringtopologie, indem sie ein Abonnement bei jeweils genau einem anderen Blackboard einrichten. Beim gewählten Blackboard darf noch kein anderer Blackboard-Agent ein Abonnement eingerichtet haben. Da das Abonnement mit einer vordefinierten Taktzeit (z.B. 5 Sekunden) versehen ist, kann das jeweilige Empfänger-Blackboard den Zustand des Senders in diesem Zeitintervall überwachen. In Abbildung 7-13 hat Blackboard BB1 ein Abonnement bei BB4, BB2 bei BB1 usw.
2. Fällt eines der Blackboards aus (wie im Beispiel BB5), so erhält das Blackboard mit dem entsprechenden Abonnement (BB3) keine zyklische Benachrichtigung mehr und kann davon ausgehen, dass der Sender ausgefallen ist. Um den nun unterbrochenen Ring wieder zu schließen, muss dieses Blackboard feststellen, bei welchem anderen Blackboard das ausgefallene sein Benachrichtigungs-Abonnement hatte. Zu diesem Zweck sendet es eine Nachricht mit der entsprechenden Anfrage an alle verbliebenen Informationsknotenpunkte.

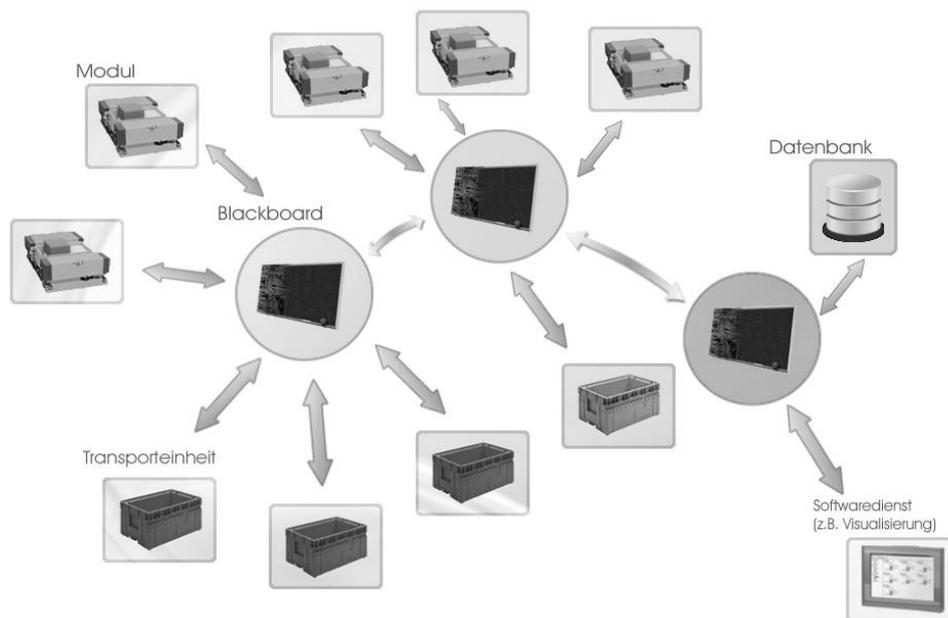
3. Nachdem das gesuchte Blackboard (BB2) dem suchenden Blackboard (BB3) geantwortet hat, richtet letzteres ein neues Abonnement bei diesem ein. Auf diese Weise wird der logische Ring wieder geschlossen. Nachdem die zyklische Benachrichtigung die IDs der aktuell bei einem bestimmten Blackboard angemeldeten Agenten enthält, kann das Blackboard mit einem Abonnement beim ausgefallenen Informationsknotenpunkt (BB2) anhand der letzten erfolgreich übermittelten Benachrichtigung diese Agenten ermitteln und sie auffordern, sich übergangsweise bei ihm anzumelden.
4. Gleichzeitig leitet das Blackboard, das den Ausfall festgestellt hat (BB3), die Instanziierung eines neuen Blackboards ein. Diesem werden die ID und der Name des ausgefallenen Blackboards zugewiesen, die nach Feststellung der Störung von dessen Abonnenten zwischengespeichert wurde. Hat sich das neu gestartete Blackboard erfolgreich im Multiagentensystem registriert, so kann die ursprüngliche Konfiguration der Ringtopologie wiederhergestellt werden, indem sich die entsprechenden Blackboards mit dem neuen Blackboard verbinden. Dafür müssen die beiden betreffenden Blackboards (BB2, BB3) nach der Störung zyklisch nach der ID des ausgefallenen Blackboards suchen. Ist diese wieder auffindbar, werden erneut die entsprechenden Abonnements eingerichtet. Nachdem das neue Blackboard (BB5) nicht wissen kann, bei welchem anderen Blackboard es zuvor sein Abonnement eingerichtet hatte, wird es vom entsprechenden Blackboard (BB2) dazu aufgefordert, bei diesem ein Abonnement einzurichten. Nachdem auf diese Weise der Ursprungszustand im Blackboardsystem wiederhergestellt ist, können sich auch die übrigen Softwareagenten wieder zum neuen Blackboard (BB5) assoziieren.

Mit dem vorgestellten Failover-Mechanismus ist es möglich, in einem verteilten Blackboardsystem verschiedene Dateninhalte zu speichern und zu replizieren, um so deren Verfügbarkeit zu erhöhen. Zusätzliche Funktionen zur Synchronisation der einzelnen Informationsknotenpunkte gewährleisten eine systemweite Datenkonsistenz in der verteilten Blackboard-Architektur.

#### **Spezialisierung verteilter Blackboards**

In Bezug auf die Blackboard-basierte, indirekte Kommunikation kann eine Gliederung der Daten in sowohl funktionale Bereiche (z.B. Visualisierungs-, Auftrags-, Status-

daten) als auch örtliche Bereiche (z.B. Lagervorzone, Wareneingang) erfolgen (vgl. Abbildung 7-14). Diese Einteilung kann der Reduktion des Datenvolumens, welches von einem einzelnen Blackboard bereitgestellt und verwaltet werden muss, dienen und somit Leistungsengpässen entgegenwirken.



**Abbildung 7-14: Verteiltes Blackboardsystem (BB<sub>n</sub>) als Datenaustauschplattform für einzelne räumliche und funktionale Bereiche einer Zellularen Fördertechnik**

Dieser Effekt ist allerdings nur im Vergleich zu einem verteilten Blackboardsystem relevant, in dem alle Blackboards dieselben Daten verwalten. Wie in diesem Abschnitt herausgearbeitet wurde, soll genau dies durch geeignete Mechanismen, wie sie in Datenbanksystemen Verwendung finden, verhindert werden. Unter Berücksichtigung dieser Prämisse erweist sich eine Blackboard-Spezialisierung als eher hinderlich für die Kommunikation in einem dezentral gesteuerten Zellularen Transportsystem. Ein Nachteil der Blackboard-Spezialisierung ist der erhöhte Verwaltungsaufwand und die Restriktionen bei der Replikation und Verteilung von Daten. Daher wurde die funktionale Spezialisierung einzelner Blackboards im Rahmen des Projekts nicht weiterverfolgt. Ein Beispiel für die räumliche Spezialisierung der Blackboards findet sich im Rahmen der Validierung in Abschnitt 8.4. Allerdings ist auch diese Form der Spezialisierung kritisch zu betrachten, da gerade verschiedene Funktionsbereiche beispielsweise eines Distributionszentrums kurzfristigen Durchsatzschwankungen unterworfen sind (siehe Abschnitt 3.1).

Diese Leistungsschwankungen wirken sich auch auf den Kommunikationsbedarf in den dort eingesetzten Transportsystemen aus. Durch die Festlegung der Blackboards auf einzelne Bereiche kann jedoch im Fall einer räumlich begrenzten Überlast keine Umverteilung auf weniger ausgelastete Informationsknotenpunkte erfolgen. Das Ziel einer fairen Lastverteilung zwischen den Informationsknotenpunkten kann so nicht erreicht werden.

Prinzipiell sollten daher alle Blackboards alle Daten aufnehmen können und analog zur in MySQL-Clustern verwendeten Shared-Nothing-Architektur anhand von Zugriffs- und Auslastungsstatistiken untereinander aushandeln, welche Informationen an welchen Knotenpunkten gespeichert werden sollten. Auf diese Weise lässt sich die Kommunikationslast gleichmäßig im verteilten Blackboardsystem ( $BB_d$ ) aufteilen. Damit können geringe Kommunikationszeiten bei gleichzeitig hoher Verfügbarkeit erreicht werden.

### **7.4 Zusammenfassung**

Die Einführung eines verteilten Blackboardsystems ( $BB_d$ , Distributed Blackboard System) als Bestandteil eines Kommunikationssystems für agentengesteuerte Zellulare Transportsysteme kann den Kommunikationsaufwand für die benötigte anlagennahe Informationsbereitstellung reduzieren und den Datenaustausch strukturieren. Das implementierte Blackboardsystem ist so gestaltet, dass es beliebige Daten aufnehmen und bereitstellen kann und Grundfunktionalitäten zur Datenverwaltung, wie z.B. Synchronisations-, Zugriffssteuerungs- oder Benachrichtigungsmechanismen, bietet, dabei jedoch weder auf eine spezielle Aufgabe zugeschnitten ist noch eine anwendungsspezifische Logik enthält. Der eingeführte Parallelbetrieb mehrerer Blackboards ermöglicht eine gesteigerte Performance und erhöht die Robustheit des Kommunikationssystems.



## 8 Validierung

In einem letzten Schritt werden sämtliche Funktionen der autonomen Fahrzeuge inkl. der Fahrzeuglogik anhand von Fahrzeugmodellen überprüft sowie das entwickelte Blackboard-basierte Kommunikationskonzept in einer regelbasierten Testumgebung validiert.

### 8.1 Funktionsüberprüfung mittels Simulation von Fahrzeugmodellen

Die Fahrzeugmodelle wurden im Simulator getestet, um sie als Basis für die Validierung nutzen zu können. Die Funktionsüberprüfung besteht aus dem Test des kinematischen und des dynamischen Verhaltens. Zusätzlich wurde das Fahrzeug mit zwei Laserscannern ausgerüstet, die den vorderen und den hinteren Bereich des Fahrzeuges überwachen. Die Scandaten konnten nicht einem definierten Abtastintervall eingelesen werden. Die Ursachen liegen in der Implementierung des Simulators, der Fehler in der internen Synchronisation aufweist. Der grundsätzliche Funktionsnachweis ist so zwar möglich, aber für Grenzsituationen sind die Ergebnisse nicht aussagekräftig.

### 8.2 Analyse der Fahrzeuglogik

Die Fahrzeuglogik besteht aus einer sequenziellen Abarbeitung einer Liste von Fahraufträgen. Die Logik basiert auf einem Zustandsautomaten, der die jeweils relevanten Algorithmen anstößt. Hierzu zählen das Anfahren eines Punktes, einer Pose und einer Winkelstellung unter Berücksichtigung von Folgeaufträgen. Bei Vorliegen eines Folgeauftrages wird im Übergang die Geschwindigkeit gehalten, ansonsten wird die bahntreue Bremsung eingeleitet.

### 8.3 Validierung der Algorithmen

Die Validierung der Algorithmen erfolgte in zwei Stufen. Zunächst wurde der Simulator genutzt, um das Einhalten der statischen Vorgaben und das dynamische Verhalten zu untersuchen. Grundsätzlich wurde das erwartete Verhalten auch bestätigt.

Aufgrund der in Abschnitt 8.1 beschriebenen Restriktionen konnte nur die grundsätzliche Funktionalität nachgewiesen werden. Auf Grund der fehlerhaften Synchronisation und der häufigen Überschreitung der Abtastintervalle wurden in einer zweiten Validierungsstufe die Algorithmen auf einem realen Fahrzeug getestet. Hier wurde das erwartete Verhalten im Wesentlichen nachgewiesen. Lediglich die optimierende Bahnplanung erfordert mehr Rechenleistung als auf dem Bordrechner zu Verfügung stand. Aus diesem Grunde wurde eine nichtoptimierende Bahnplanung auf Basis von Bézierkurven eingesetzt.

Das präzise Anfahren von Posen mit Unterstützung ortsfester Baken konnte auch im praktischen Betrieb gezeigt werden. Offene Probleme existieren beim Übergang zwischen den verschiedenen Betriebsarten wie beispielsweise dem Ausweichen und dem Anfahren von Punkten und Posen. Hier kommt es gelegentlich zu leichten Überschwingvorgängen, die ihre Ursache in den Reglereinstellungen haben. Hier gilt es, einen Kompromiss zwischen schneller Reaktion einerseits und geringem Überschwingen andererseits zu finden. Hier bedarf es noch einer globalen Optimierung der Parameter.

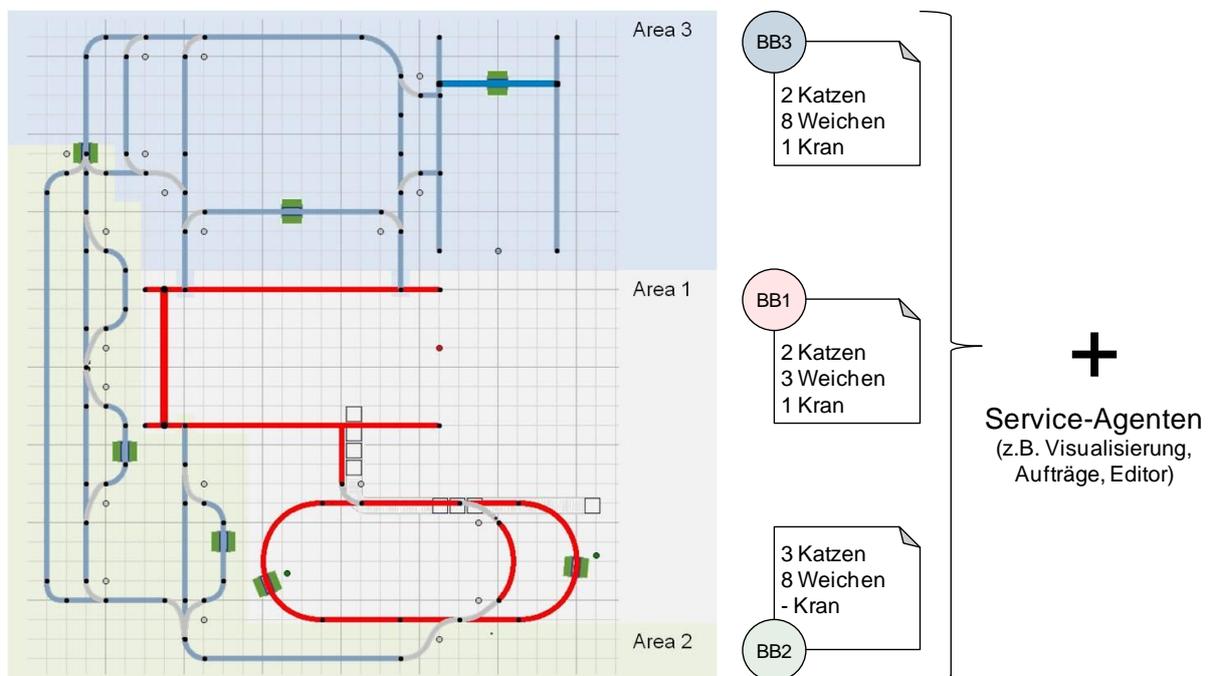
### **8.4 Analyse des Kommunikationsverhaltens**

Da die Simulationsplattform der Zellularen Fördertechnik erst im Projektverlauf entwickelt wurde und daher nur eingeschränkt zum Test der Kommunikationsinfrastruktur zur Verfügung stand, kam in diesem Zusammenhang ein weiteres Softwaresystem zum Einsatz. Es handelt sich dabei um ein Multiagentensystem zur Steuerung einer Elektrohängebahn (EHB), welches im Rahmen des BMBF-Projekts „Internet der Dinge“ (siehe Abschnitt 2.3) konzeptioniert und implementiert wurde [Gün-2010]. Da dieses System bereits über eine Visualisierung, einen Auftragsgenerator sowie über kooperierende Softwareagenten nach FIPA-Spezifikation verfügt, stellt es eine gut geeignete Entwicklungs- und Testumgebung für die Informationsknotenpunkte dar.

In dieser regelbasierten Visualisierungs- und Testumgebung erfolgte die erfolgreiche qualitative Funktionsüberprüfung sowohl des Single Blackboard Systems ( $BB_1$ ) als auch des Distributed Blackboard Systems ( $BB_d$ ). Informationen, welche die einzelnen Teilnehmer des Multiagentensystems zur Erfüllung ihrer jeweiligen Aufgabe benöti-

gen und die aufgrund ihrer Relevanz für viele Endpunkte für einen Austausch via Informationsknotenpunkt vorgesehen sind, werden durch das Blackboardsystem effizient verwaltet, sodass es zu keinen Verzögerungen in den simulierten Prozessen aufgrund zu spät eintreffender Nachrichten kommt.

Das Szenario einer agentengesteuerten Elektrohängebahn (Abbildung 8-1) dient auch der Umsetzung einer räumlichen Spezialisierung der verteilten Blackboards. In diesem Szenario registrieren sich die Agenten der Fördertechnikmodule (Kran, EHB-Katze, Weiche) in Abhängigkeit ihrer (aktuellen) Position beim für den entsprechenden Bereich zuständigen Blackboard. Dieses verwaltet eine Tabelle aller Wegpunkte, die diesem Bereich angehören und kann so anhand der aktuellen Position eines anfragenden Agenten feststellen, ob es für diesen zuständig ist.



**Abbildung 8-1: Bereichsweise Blackboard-Zuweisung am Beispiel einer EHB-Anlage**

Wie in Abschnitt 7.3 festgestellt wurde, kann diese räumliche Spezialisierung einzelner Blackboards jedoch zu einem Ungleichgewicht in der Auslastung der einzelnen Blackboards führen. Dies lässt sich anhand des Beispielszenarios in Abbildung 8-1 verdeutlichen: Wenn sich aufgrund der aktuellen Auftragslage alle sieben EHB-Katzen im rot (dunkel) gekennzeichneten Schienenbereich (Area 1) aufhalten und sich dementsprechend beim zuständigen Blackboard BB1 anmelden, so muss dieses beinahe den kompletten Datenaustausch im System verwalten, da die Weichen- und Kran-Agenten der anderen Bereiche lediglich mit ihren Blackboards kommunizieren

müssen, wenn sie ihren Status oder ihre Position auf Anfrage einer EHB-Katze ändern. Eine komplette, lastabhängige Verteilung der Daten auf Basis von Zugriffs- und Auslastungsstatistiken der einzelnen Blackboards ist daher einer Spezialisierung vorzuziehen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass anhand der regelbasierten Testumgebung die prinzipielle Eignung des erarbeiteten Kommunikationskonzepts auf Basis des in Abschnitt 6.2.2 festgelegten Datenformats XML und einer Mischform aus direkter Peer-to-Peer-Kommunikation und indirekter Kommunikation via verteiltem Blackboardsystem validiert werden konnte.

Für die Bewertung der in Abschnitt 6.2.1 gewählten Kommunikationstechnologien sind aber noch weitere Tests unter Realbedingungen nötig, v.a. um das Zeitverhalten und die Zuverlässigkeit bewerten zu können. Dafür müssen sämtliche Modulagenten auch physisch getrennt werden und auf verteilten Plattformen laufen, die nur über ein Funknetzwerk miteinander und der/den Blackboardplattform(en) verbunden sind.

## 9 Forschungsergebnisse und Ausblick

Im abschließenden Kapitel wird eine kurze Zusammenfassung der im Projekt erzielten Ergebnisse gegeben sowie deren wirtschaftlicher Nutzen in möglichen industriellen Anwendungen aufgezeigt. Die im Rahmen des Projekts verwendeten Mittel werden erläutert. Ein Ausblick auf zukünftige Arbeitsfelder sowie ein Fazit beschließen den Bericht.

### 9.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Die Forschungsergebnisse lassen sich entsprechend des Projekttitels in zwei Kategorien gliedern. Einerseits wurden praxisgerechte Steuerungsalgorithmen für die Fahrzeuge einer Zellularen Fördertechnik entwickelt. Diese Algorithmen haben sich auch bereits im Einsatz auf realen Fahrzeugen (Multishuttle Move, vgl. Abschnitt 2.1.2) bewährt. Für den Test der Algorithmen wurde eine Simulationsplattform mit physikalischen Fahrzeug-, Antriebs- und Sensormodellen erstellt.

Andererseits wurden in einem zweiten Projektschwerpunkt Kommunikationssysteme für den Datenaustausch innerhalb des Fahrzeugkollektivs bzw. mit peripheren Einrichtungen konzeptioniert. In diesem Zusammenhang erfolgte eine Analyse der in einem Materialflusssystem vorhandenen bzw. benötigten Informationen und eine Ableitung der für die Fahrzeuge einer Zellularen Fördertechnik relevanten Daten. Um die zuverlässige Übertragung dieser Daten zu gewährleisten, wurde in einer breit angelegten Recherche nach geeigneten Funkstandards, Protokollen und Datenformaten gesucht. Durch eine Bewertung der gefundenen Lösungsalternativen hinsichtlich zuvor definierter Kriterien erfolgt eine Eingrenzung der Kommunikationsinfrastruktur einer Zellularen Fördertechnik. Ergänzend erfolgte die Implementierung von Informationsknotenpunkten (Blackboards) als zusätzliche Komponente der Kommunikationsinfrastruktur. Blackboards sorgen durch eine Entkopplung von Sender und Empfänger für eine Verringerung der Kommunikationslast im Gesamtsystem und beugen somit Überlastungen vor.

Zusammengefasst stellen die entwickelten Algorithmen und Kommunikationssysteme das Fundament für die Fahrzeugsteuerung und den Datenaustausch in zukünftigen Umsetzungen Zellularer Transportsysteme für den industriellen Einsatz dar.

### 9.2 Ausblick

Die in diesem Bericht vorgestellten Ergebnisse bilden die Grundlage für zukünftige Umsetzungen einer Zellularen Fördertechnik in praktischen Anwendungen. Auf dem Weg dorthin gilt es allerdings einige offene Fragestellungen zu klären.

Hinsichtlich der Steuerungsalgorithmen ist ein „sanftes“ Umschalten zwischen unterschiedlichen Reglern anzustreben, sodass sich beispielsweise die Winkelauflösung eines 2D-Laserscanners situationsabhängig anpassen lässt (Feinpositionierung → hohe Auflösung, Geradausfahrt mit aktiver Kollisionsvermeidung → geringe Auflösung). Zudem müssen manche der Algorithmen noch für höhere Fahrgeschwindigkeiten optimiert werden.

Hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit der entwickelten Kommunikationskonzepte können Tests unter Realbedingungen detaillierte Erkenntnisse liefern. Auch für das Blackboardsystem können weitere Tests Aufschluss über die Performance und die Robustheit geben. Diese Versuchsreihen können zunächst rein softwarebasiert erfolgen, sollten aber auf jeden Fall auch unter Realbedingungen durchgeführt werden, um das reale Zeitverhalten innerhalb einer Zellularen Fördertechnik ausreichend zu berücksichtigen.

Abgesehen von diesen konkreten und auf die Projektergebnisse abzielenden Fragestellungen gibt es auch einige allgemeine zukünftige Forschungsinhalte im Bereich Zellularer Transportsysteme. So stellt sich die Frage, wie eine noch engere Kooperation zwischen den Fahrzeugen beispielsweise in Form einer gemeinsamen Ausführung von Transportaufträgen realisiert werden kann. Hierfür sind spezielle Algorithmen zur dezentralen Steuerung von Formationsfahrten nötig. Entsprechende Untersuchungen sind zum Teil bereits Inhalt laufender Forschungsprojekte.

Abgesehen von einer Weiterentwicklung der software- und hardwaretechnischen Komponenten Zellularer Fördertechniksysteme spielt in Hinsicht auf deren Akzeptanz als Substitut für herkömmliche Fördertechnik auch die Ermittlung von belastbaren Leistungsdaten eine entscheidende Rolle. Benötigt werden quantitative Aussagen

---

über Kennwerte wie Durchsatz, Verfügbarkeit, Energieverbrauch und Zuverlässigkeit Zellularer Transportsysteme. Diese Werte sind in realen Umgebungen zu ermitteln und in Relation zu herkömmlicher Fördertechnik zu beurteilen. Nur wenn eine Zellulare Fördertechnik in diesem Vergleich ihre Konkurrenzfähigkeit beweisen kann, wird sie Einzug in industrielle Anwendungen finden. Entsprechend zukunftsweisend ist das bereits in Abschnitt 2.1.2 vorgestellte Testszenario am Fraunhofer IML einzustufen [Kam-2011]. Dort können anhand von 50 Fahrzeugen erstmals Erkenntnisse zum Schwarmverhalten und der Leistungsfähigkeit einer Zellularen Fördertechnik in einem realen Umfeld gewonnen werden.

### **9.3 Fazit**

Im Rahmen des diesem Bericht zugrunde liegenden Forschungsprojekts wurden Ansätze der mobilen Robotik auf ein Fahrzeugkollektiv übertragen, welches autonom oder kooperativ logistische Aufgaben erfüllen kann. Für eine effiziente und zuverlässige Kommunikation zwischen den Fahrzeugen sowie mit peripheren Einrichtungen wurden Informationsknotenpunkte implementiert und in eine verteilte Struktur überführt, um das Ausfallrisiko zu minimieren.

Die im Projektverlauf implementierte Simulationsumgebung erreicht durch die Verwendung physikalischer Modelle der Fahrzeuge, der Antriebe und der Sensoren eine hohe Modellierungstiefe. Mit dieser Modellierungstiefe ist es möglich, Algorithmen nach dem Test in der Simulationsumgebung direkt in eine physische Umsetzung zu übernehmen. Auf diese Weise lässt sich der Aufwand für Tests sowie Parameteranpassung und -optimierung bei der Inbetriebnahme verringern.

Mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens in Form angepasster Steuerungskonzepte, Algorithmen, Kommunikationssysteme sowie einer realitätsnahen Simulationsumgebung wurden die Voraussetzungen für die praktische Umsetzung Zellularer Transportsysteme geschaffen.



## Literaturverzeichnis

- [Alb-2010] Albrecht, T.: Mobile Roboter schwärmen – Zellulare Fördertechnik statt konventioneller Rollenbahnen. In: Logistik entdecken – Magazin des Fraunhofer-Instituts für Materialfluss und Logistik IML Dortmund, o. Jg. (2010) Nr. 8, S. 12-17.
- [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.
- [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.
- [Bow-1996] Bowersox, D. J.; Closs, D. J.: Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process. McGraw-Hill Companies: 1996. ISBN 978-0070068834.
- [Büc-2000] Büchter, H.: Steuerungen für Stückgutfördersysteme: Entwicklungspotenziale und Trends. In: F+H Fördern und Heben, Jg. 50 (2000) Nr. 3, S. 156-158, ISSN 0341-2636.
- [Bul-2007] Bullinger, H.-J.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge. Springer, Berlin u.a.: 2007. ISBN 978-3-540-36729-1.
- [BUN-2009] Bundesnetzagentur: Allgemeinzuteilung von Frequenzen für Funkanwendungen für intelligente Verkehrssysteme („Intelligent Transport Systems“, ITS). Vfg. Nr. 69 / 2009.
- [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](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.
- [Cor-1991] Corkill, D. D.: Blackboard Systems. In: AI Expert, Jg. 6 (1991) Nr. 9, S. 40-47, ISSN 0888-3785.
- [Cra-1995] Craig, I.: Blackboard Systems. Intellect Books Ablex Publishing Corporation, Norwood, New Jersey: 1995. ISBN 978-0-8939-1594-0.
- [Cre-2006] Creutz, O.: Endstation Pflegeroboter-Heim. In: Die Welt, Jg. 61 (2006) Nr. 47, ISSN 0173-8437.
- [FAH-2003] FAHRLOS (Fahrzeugleitsteuerung – Open Source): openTCS. Entwicklung im Rahmen des BMWA-Projektes „InnoNet – Förderung von innovativen Netzwerken“, 2003. [http://www.vdivde-it.de/innonet/projekte/fj/in\\_pp047\\_fahrlos.pdf](http://www.vdivde-it.de/innonet/projekte/fj/in_pp047_fahrlos.pdf), Download: 19.03.2012.
- [Fat-1994] Fathi-Torbaghan, M.; Höffmann, A.: Fuzzy Logik und Blackboardmodelle in der technischen Anwendung. Oldenbourg Verlag, München, Wien: 1994. ISBN 978-3486226508.
- [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. Abruf: 14.11.2011.
- [FML-2012] fml-Logistikkompodium: Eintrag „Bereitstellprinzipien“. <http://kompodium-int.fml.mw.tu-muenchen.de/Logistikkompodium/index.html>, Download: 23.02.2012.
- [Fuj-2000] Fujimoto, R. M.: Parallel and Distributed Simulation Systems. Wiley- Interscience Publication, New York u.a.: 2000. ISBN 978-0-471-18383-9.

- [Fur-2009] Furmans, K.; Mayer, S.: Vollständig dezentraler und autonomer Flexförderer – Neun Module im Versuchsbetrieb. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 49 (2009) Nr. 6, S. 308-309.
- [Ger-2004] Gerber, A.: Flexible Kooperation zwischen Autonomen Agenten in Dynamischen Umgebungen. Dissertation: Universität des Saarlandes, Mai 2004.
- [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-1203-90622.html>, Download: 20.03.2012.
- [Gom-1996] Gomber, P.; Schmidt, C.; Weinhardt, C.: Elektronische Märkte für die dezentrale Transportplanung. Universität Karlsruhe, September 1996. [http://www.econbiz.de/archiv/ka/uka/information/elektronische\\_maerkte\\_transport.pdf](http://www.econbiz.de/archiv/ka/uka/information/elektronische_maerkte_transport.pdf), Download: 28.11.2011.
- [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, S. 26-34, ISSN 0018-9235 (<http://dx.doi.org/10.1109/MSPEC.2008.4547508>).
- [Gün-2004] Günthner, W. A.; Wilke, M.: M2 - Wandelbare Logistikstrukturen in Mini-fabriken. In: Arbeits- und Ergebnisbericht des Sonderforschungsbereichs 582: Marktnahe Produktion individualisierter Produkte. Technische Universität München, München: 2004, S. 299-333.
- [Gün-2006a] Günthner, W. A.; Heinecker, M.; Wilke, M.: Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen. Technische Universität München, 2006.
- [Gün-2006c] Günthner, W. A.; Chisu, R.; Kuzmany, F.: Selbststeuernde Materialflussmittel – Ein Technologiebaukasten 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, Hamburg: 2006, S. 307-319.

- [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. 8, S. 556-558, ISSN 0341-2636.
- [Gün-2010a] Günthner, W. A., ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Springer, Berlin u.a.: 2010.
- [Gün-2010b] Günthner, W. A.: Materialfluss und Logistik. Vorlesungsskriptum: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2010.
- [Hei-2011a] Heiserich, G.: Kooperative Ablaufsteuerung für innerbetriebliche Materialflusssysteme. Dissertation. PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, Hannover: 2011.
- [Hei-2011b] Heidenblut, V.: Kompaktlagersysteme im Vergleich – Pro und Contra ausgewählter Technologien. In: F+H Fördern und Heben, Jg. 61 (2011) Nr. 5, S. 222-226, ISSN 0341-2636
- [Hep-2007] Heptner, K.; Günthner, W. A.: Technische Innovationen für die Logistik. Huss-Verlag, München: 2007.
- [Hip-2009] Hippenmeyer, H.; Furmans, K.; Stoll, T.; Schönung, F.: KARIS – dezentral gesteuert. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 49 (2009) Nr. 6, S. 304-306, ISSN 0017-9442.
- [Hom-2004] ten Hompel, M.; Sondhof, U.; Libert, S.: Vorzüge dezentraler autonomer Steuerungssysteme. In: F+H Fördern und Heben, Jg. 54 (2004) Nr. 11, S. 640-641, ISSN 0341-2636.
- [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.: 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](http://dx.doi.org/10.2195/LJ_Not_Ref_d_tenHompel_082006)).
- [Hom-2006c] ten Hompel, M., Trautmann, A.: Modellierung prozessadaptiver Agenten zur Steuerung autonomer Lagerfahrzeuge. In: Konferenzband zum 3. Wissenschaftssymposium Logistik in Dortmund, 30. - 31. Mai 2006, Dortmund. Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg: 2006. ISBN 978-387154-340-1, S. 40-54.
- [Hom-2006d] ten Hompel, M.: Von Agenten und Autonomen. In: Software in der Logistik – Markt-Spiegel. Huss Verlag, München: 2006. ISBN 3-937711-28-7, S. 14-21.
- [Hom-2006e] 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-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.
- [Irr-2007] Irrgang, R.: Standards für erfolgreiche Logistikprojekte. In: Logistik für Unternehmen, Jg. 21 (2007) Nr. 3, S. 64-67, ISSN 0930-7834.
- [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](http://www.isa.org/Content/Microsites1134/SP100,_Wireless_Systems_for_Automation/Home1034/ISA100_Overview_Oct_2008.pdf). Oktober 2008. Download: 18.01.2012.

- [Jia-2008] Jiang, D.; and L. 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.
- [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.
- [Jun-2004] Jungmann, V.: „MultiShuttle“ als Alternative in der Behälterlagertechnik. In: Logistik für Unternehmen, Jg. 18 (2004) Nr. 6, S. 35-37, ISSN 0930-7834.
- [Jun-2011] Jungbluth, V.: Der Schwarm auf der Schiene – Smart Carrier: Flexibel, skalierbar, systemsicher. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 51 (2011) Nr. 4, S. 178-179, ISSN 0017-9442.
- [Kam-2011] Kamagaew, A.; Große, E.: Multimodales Intralogistikkonzept: Zellulare Transportsysteme – Multishuttle Move. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 51 (2011) Nr. 4, S. 170-172, ISSN 0017-9442.
- [Kär-2012] Kärcher Vertriebs-GmbH: RoboCleaner. [www.robocleaner.de](http://www.robocleaner.de), Download: 08.02.2012.
- [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.
- [Law-2009] Lawrenz, W. (Hrsg.): CAN Contoller Area Network – Grundlagen und Praxis. 5., überarbeitete Auflage. Hüthig Verlag, Heidelberg: 2009. ISBN 978-3778529065.
- [Lib-2011] Libert, S.: Beitrag zur agentenbasierten Gestaltung von Materialflusssteuerungen. Disseration. Verlag Praxiswissen, Dortmund: 2011. ISBN 978-3-86975-049-1.
- [Lie-2007] Liekenbrock, D.: Software-Agenten. 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.
- [LOG-2012] Logistik Baden-Württemberg: Definition „Distributionszentrum“. [http://www.logistik-bw.de/Begriffserklaerung.146+M55258e6ae72.0.html?&tx\\_a21glossary%5Bback%5D=24&tx\\_a21glossary%5Buid%5D=16](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-2006b] Marsiske, H.-A.: Bedingt einsatzbereit. In:c't 12/2006, S. 60-62, ISSN 0724-8679.
- [Mar-2010] Marsiske, H.-A.: Dienstleister, Retter... und Fußballer – RoboCup German Open. In:c't 10/2010, S. 52-54.
- [Mar-2012a] Marsiske, H.-A.: Autonome Vorhut – Neue Techniken bei Rettungsrobotern. In:c't 2/2012, S. 72-75, ISSN 0724-8679.
- [Mar-2012b] Marsiske, H.-A.: Volles Verständnis – Teamfähige Roboter sollen Rettungskräfte unterstützen. In:c't 2/2012, S. 76-77, ISSN 0724-8679.
- [Mat-2005] Mathias, C. J.; Phifer, L.: The Evolving Wireless Landscape. In: Business Communications Review, o. Jg. (2005) April, S. 18-23.

- [May-2009] Mayer, S. H.: Development of a completely decentralized control system for modular continuous conveyors. Dissertation. Universitätsverlag Karlsruhe, 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](http://dx.doi.org/10.2195/LJ_Ref_Mayer_Libert_tenHompel)).
- [Mön-2001] Mönch, L.: Analyse und Design für ein agentenbasiertes System zur Steuerung von Produktionsprozessen in der Halbleiterindustrie. In: Tagungsband vertIS 2001. Bamberg: 2001, S. 99-112.
- [Mül-2000] Müller, S.; Ndengue, E. N.; Kortmann, P.; Kleinevoß, T.; Weber, P.; Uenking, S.; Praczyk, J.: Der Kranbaukasten KBK – Mit Neuentwicklungen in die Zukunft. In: Günthner, W. A.; Reinhart, G. (Hrsg.): Abschlussbericht MATVAR – Materialflusssysteme für variable Fertigungssegmente im dynamischen Produktionsumfeld. Herbert Utz Verlag, München: 2000, S. 7|1-7|10.
- [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.
- [Nde-1999] Ndengue, E. N.: Dezentrales Signalverarbeitungssystem für komplexe Überwachungs- und Regelungsaufgaben. Dissertation. VDI-Verlag, Düsseldorf: 1999. ISBN 978-3-18-374608-8.
- [NE124] NAMUR-Empfehlung 124: Anforderungen an Wireless Automation (Version: 06.09.2010). Erstellt durch: NAMUR-Arbeitskreis 4.15 "Wireless Automation". NAMUR-Geschäftsstelle, Leverkusen: 2010.
- [Neh-2002] Nehmzow, U.: Mobile Robotik – Eine praktische Einführung. Springer, Berlin u.a.: 2002. ISBN 3-540-42858-5.

- [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 rationale Abläufe. In: F+H Fördern und Heben, Jg. 61 (2011) Nr. 5, S. 216-218, ISSN 0341-2636.
- [Nop-2011] Nopper, J. R.: Eine Methodik zur Bewertung von Wandelbarkeit in der Intralogistik am Beispiel selbstorganisierter Materialflusssysteme. Dissertation. Verlag Praxiswissen, Dortmund: 2011. ISBN 978-3-86975-040-8.
- [Ove-2010] Overmeyer, L.; Vents, 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, S. 688-689, ISSN 0017-9442.
- [Pfo-2010] Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme – Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 8. Auflage. Springer, Berlin u.a.: 2010.
- [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.

- [Rot-2005] Roth, J.: Mobile Computing: Grundlagen, Technik, Konzepte. 2., aktualisierte Auflage. dpunkt-Verlag, Heidelberg: 2005.
- [Sch-2004] Schraft, R. D.; Hägele, M.; Wegener, K. (Hrsg.): Service - Roboter - Visionen. Carl Hanser Verlag, München: 2004. ISBN 978-3-446-22840-5.
- [Sch-2005] Schroer, W.: MultiShuttle – universell einsetzbar. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 45 (2005) Nr. 1-2, S. 34-36, ISSN 0017-9442.
- [Sch-2006] Schnell, G.; Wiedemann, B. (Hrsg.): Bussysteme in der Automatisierung und Prozesstechnik. 6., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden: 2006. ISBN 3-83480045-7.
- [Sch-2007] Scholz-Reiter, B.; de Beer, C.; 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-2010] Schuldt, A.: Multiagent coordination enabling autonomous logistics. Springer: Berlin u.a.: 2011. ISBN 978-3-64-220091-5.
- [Sha-1949] Shannon, C. E.; Weaver, W.: The Mathematical Theory of Communication. The University of Illinois Press, Urbana: 1949.
- [Som-2011] Sommer, C.: Car-to-X Communication in Heterogeneous Environments. Dissertation. <http://www.opus.ub.uni-erlangen.de/opus/volltexte/2011/2657/pdf/ChristophSommerDissertation.pdf>. Erlangen, Nürnberg: Technische Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg. 2011.
- [Ste-2002] Stenzel, R.: Steuerungsarchitekturen für autonome mobile Roboter. Dissertation: RWTH Aachen. Aachen. 2002.

- [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 - The Impact of Virtual, Remote, and Real Logistics Labs, Bremen, 28. Februar - 1. März 2012. Springer, Berlin u.a.: 2012. ISBN 978-3-642-28815-9, S. 90-101.
- [Ull-2006] Ullrich, G.; Simen, F.; Sommer-Dittrich, T.: Quo Vadis, FTS? (2/2). In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 46 (2006) Nr. 1-2, S. 14-16, ISSN 0017-9442.
- [Ull-2011] Ullrich, G.: Fahrerlose Transportsysteme. Eine Fibel – mit Praxisanwendungen – zur Technik – für die Planung. Vieweg+Teubner, Wiesbaden: 2011.
- [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, S. 1-53, ISSN 0360-0300.
- [Uzc-2009] Uzcátegui, R. A.; Guillermo, A.-M.: WAVE: A Tutorial. In: IEEE Communications Magazine, Jg. 47 (2009) Nr. 5, S. 126-133, ISSN 0163-6804 (<http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2009.4939288>).
- [VDI/VDMA 5100] VDI/VDMA-Richtlinienentwurf 5100:2011: Systemarchitektur für die Intra-logistik (SAIL). Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Frankfurt/Main. Beuth, Berlin: 2011.
- [VDI2510] VDI 2510:2005: Fahrerlose Transportsysteme (FTS). Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf. Beuth, Berlin: 2005.
- [VDMA15276] VDMA-Einheitsblatt 15276:1994: Datenschnittstellen in Materialflusssystemen. Zurückziehungsdatum: 02.07.2008. Verein Deutscher Ingenieure 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 26<sup>th</sup> November 2008. <http://www.w3.org/TR/2008/REC-xml-20081126>, Download: 19.03.2012.
- [Weh-2008] Wehking, K.-H.; Vorwerk, C.: Zukünftig: Stückgutförderung mit Fahrzeugenschwarm. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 48 (2008) Nr. 5, S. 242-245, ISSN 0017-9442.
- [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, S. 24-26, ISSN 0017-9442.
- [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, S. 80-82, ISSN 0017-9442.
- [Wil-2006] Wilke, M.: Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen. Dissertation. 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.
- [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: Kooperierendes Fahrzeugkollektiv als Ersatz für konventionelle Fördertechnik .....	2
Abbildung 1-2: $\mu$ Carrier/microCarrier (l.) und Zellulare Fördertechnik (Bildquellen: fml, IML) .....	3
Abbildung 2-1: Schweißroboter (l.) und Palettierer (Bildquelle: KUKA) .....	11
Abbildung 2-2: Humanoide Roboter: HRP-3 (a), Rollin' Justin (b), ASIMO (c); Spielroboter Aibo (d); Spielfeld beim RoboCup (e) (Bildquellen: Kawada, DLR, Honda, Sony, RoboCup) .....	12
Abbildung 2-3: Asendro Scout (a); BigDog (b); Hibiscus (c); Mars Rover Spirit (d) (Bildquellen: Robowatch, Boston Dynamics, Chiba Institute, NASA) .....	13
Abbildung 2-4: RoboCleaner 3000 (l.); Pflegeroboter RI-MAN (Bildquellen: Kärcher, Riken).....	13
Abbildung 2-5: Systematik der mobilen flurgebundenen Systeme [VDI2510].....	15
Abbildung 2-6: Kiva Mobile Fulfillment System (Bildquelle: Kiva).....	16
Abbildung 2-7: BlnE (Basic Intralogistic Element, l.) und KARIS (Kleinskaliges Autonomes Redundantes IntralogistikSystem) (Bildquelle: IFL, Karlsruhe).....	17
Abbildung 2-8: Konzepte KaTe (Kleine Autonome Transporteinheit, l.) und Doppelkufensystem (Bildquelle: IFT, Stuttgart) .....	17
Abbildung 2-9: Autonomous Robotic Carrier ARC2 (l.) und Dematic Multishuttle® (Bildquellen: Swisslog, Dematic) .....	18
Abbildung 2-10: Multishuttle Move (Bildquellen: IML, Dematic).....	19
Abbildung 2-11: Zentrale (a), hierarchische/verteilte (b) und dezentrale (c) Steuerungsorganisation (in Anlehnung an [Jün-1998, S. 142]) .....	21
Abbildung 2-12: Hardwarekonfiguration und Steuerungsarchitektur der Materialflusssteuerung nach [VDMA15276] .....	22
Abbildung 2-13: Entitäten eines Internet der Dinge in der Intralogistik [Gün-2010a, S. 55] .....	25

Abbildung 2-14: Eine Übertragung des Internet-der-Dinge-Konzepts auf die Intralogistik ermöglicht hierarchielose Materialflusssysteme auf Basis kooperierender Entitäten [Gün-2010a, S. 45] .....	26
Abbildung 2-15: Zwei-Schichten-Architektur für Module [Chi-2010, S. 28] .....	27
Abbildung 2-16: Das ISO/OSI Referenzmodell.....	28
Abbildung 2-17: WAVE Protokollstapel (in Anlehnung an [Uzc-2009]) .....	32
Abbildung 2-18: Klassifikationsschema für Car-to-X-Anwendungen (nach [Som-2011, S. 43]).....	34
Abbildung 2-19: Geografischer Unicast (a), Topologiebasierter Broadcast (z.B. 2 Hops)(b), Geografie-basierter Broadcast / Anycast (c), Geografie-basierter Broadcast mit Datentransport ins Zielgebiet (d) [C2C-2007] .....	39
Abbildung 2-20: C2C-CC Protokollstapel (in Anlehnung an [C2C-2007, S. 33]).....	41
Abbildung 3-1: Lagerbestände beim Güterfluss durch den Absatzkanal [Pfo-2010, S. 88] .....	43
Abbildung 3-2: Lagerhausbereiche (in Anlehnung an [Bow-1996, S. 397]) .....	44
Abbildung 3-3: Ware-zum-Mann(WzM)-Prinzip (Bildquelle: fml).....	47
Abbildung 3-4: Bereichsabhängige Durchsatzschwankungen im Tagesverlauf .....	48
Abbildung 3-5: Unterscheidung von Lagerhausarten nach ihrer Funktion [Pfo-2010, S. 113].....	49
Abbildung 3-6: Ableitung prozessbedingter Anforderungen an die Fördertechnik in einem Distributionszentrum .....	50
Abbildung 4-1: Lokales Koordinatensystem mit Ursprung im kinematischen Mittelpunkt.....	57
Abbildung 4-2: Momentanpol M und Bahnradius r.....	58
Abbildung 4-3: Bewegungen durch Translation und Rotation.....	59
Abbildung 4-4: Visualisierung der Messwerte eines Lasersanners.....	60
Abbildung 4-5: Komponenten einer Simulationsumgebung für die Zellulare Fördertechnik.....	61

---

Abbildung 4-6: Typische Sensoren und Aktoren eines mobilen Roboters .....	61
Abbildung 4-7: Kommunikation zwischen Player Server, Player Client und Stage ...	62
Abbildung 5-1: Relative Lokalisierung zu zwei ortsfesten Baken .....	63
Abbildung 5-2: Kollisionserkennung unter Berücksichtigung der Hüllkurve .....	65
Abbildung 5-3: Bestimmung des freien Weges und des freien Winkels.....	66
Abbildung 5-4: Bewegung des kinematischen Mittelpunktes bis zur Kollision der Fahrzeufperipherie mit dem Hindernis .....	66
Abbildung 5-5: Spurtreues Bremsen durch konstantes Geschwindigkeitsverhältnis	67
Abbildung 5-6: Hallenlayout mit festen Einbauten (1), Segmentierung der Grund- fläche (2), Bestimmung der Segmentschwerpunkte (3), Aufspannen eines Wegenetzes (4) .....	68
Abbildung 5-7: Fahrten von Pose zu Pose .....	69
Abbildung 5-8: Vorwärts- und Rückwärtsfahrten zwischen jeweils zwei Null-Grad- Posen, die auf eine Linie liegen.....	69
Abbildung 5-9: Vorwärts- und Rückwärtsfahrten zwischen jeweils zwei gegensinnigen Posen, die auf eine Linie liegen.....	69
Abbildung 5-10: Vorwärts- und Rückwärtsfahrten zwischen jeweils zwei gleich- sinnigen 90°- Posen, die auf eine Linie liegen.....	70
Abbildung 5-11: Vorwärts- und Rückwärtsfahrten zwischen jeweils zwei gegen- sinnigen 90°- Posen, die auf eine Linie liegen.....	70
Abbildung 5-12: Abfahren einer Punktsequenz .....	70
Abbildung 5-13: Bezierkurve zur Bahnplanung.....	71
Abbildung 5-14: Mögliche Bahnkurven bei unterschiedlicher Wahl der Stützstellen.	73
Abbildung 5-15: Abfahren einer zuvor geplanten Bahn .....	74
Abbildung 5-16: Bahnplanung mit anschließender Bahnregelung .....	74
Abbildung 5-17: Geplante Bahnkurve .....	74
Abbildung 5-18: Bahnplanung im Regelkreis.....	75

Abbildung 6-1: Vorgehensweise bei der Gestaltung eines anforderungsgerechten Kommunikationssystems für die Zellulare Fördertechnik .....	77
Abbildung 6-2: Schematische Darstellung eines allgemeinen Kommunikationssystems (in Anlehnung an [Sha-1949, S. 5]) .....	78
Abbildung 6-3: Kriterium "Anzahl der Endpunkte" (S: Sender, E: Empfänger) .....	83
Abbildung 6-4: Entscheidungsbaum zur strukturierten Klassifizierung von Informationen.....	84
Abbildung 6-5: Beispielhafte Klassifizierung zweier unterschiedlicher Informationsarten .....	84
Abbildung 6-6: Qualitative Einordnung der Informationsarten nach den Kriterien Datenmenge und Zeitvorgaben.....	85
Abbildung 6-7: Klassifikation von Bussystemen (in Anlehnung an [Nde-1999, Sch-2006]) .....	87
Abbildung 6-8: Lizenzfrei nutzbare Frequenzen im elektromagnetischen Spektrum [ZVEI-2008] .....	92
Abbildung 6-9: Funkbeeinflussung beim Parallelbetrieb mehrerer Funknetze bei gleichzeitiger zeitlicher, räumlicher und frequenzmäßiger Überlappung .....	92
Abbildung 6-10: Protokollstapel IEEE 802.15.4 und ZigBee.....	99
Abbildung 6-11: Anwendungsklassifizierung nach dem ISA-SP100 Komitee [ISA-2008] .....	107
Abbildung 6-12: Auswahl geeigneter Datenformate in Abhängigkeit der Informationsart .....	110
Abbildung 6-13: Entwurf für ein Datagramm mit flexibler Länge.....	111
Abbildung 6-14: Steuerungsorganisation nach VDMA 15276.....	113
Abbildung 6-15: Einsatz eines Multiagentensystems (MAS) zur Steuerung der Zellularen Fördertechnik.....	114
Abbildung 6-16: Dezentrale Steuerung mittels Multiagentensystem nach dem Internet-der-Dinge-Prinzip .....	116
Abbildung 7-1: Funktionen und Komponenten des Blackboardsystems.....	123

---

Abbildung 7-2: Zugriffssteuerung über Sperrungen.....	126
Abbildung 7-3: UML-Sequenzdiagramm der umgesetzten Zugriffssteuerung .....	127
Abbildung 7-4: Informationsbeschaffung über direktes Anfragen (Pull-Prinzip).....	128
Abbildung 7-5: Informationsbeschaffung über Abonnements (Push-Prinzip) .....	128
Abbildung 7-6: UML-Sequenzdiagramm des umgesetzten Benachrichtigungs- mechanismus .....	129
Abbildung 7-7: Das Blackboard als Schnittstelle zu übergeordneten Systemen ....	130
Abbildung 7-8: Grafische Oberfläche eines verteilten Blackboardsystems (BB <sub>d</sub> ) bestehend aus fünf Informationsknotenpunkten.....	132
Abbildung 7-9: Beispielhafte MySQL-Cluster-Architektur mit einem Mindestmaß an Redundanz für alle MySQL-Komponenten [MYS-2007] .....	135
Abbildung 7-10: Beispielhaftes MySQL-Cluster [MYS-2007].....	136
Abbildung 7-11: Komplette Datenverfügbarkeit trotz des Ausfalls von Datenknoten in beiden Knotengruppen [MYS-2007] .....	136
Abbildung 7-12: Fehlererkennung bei parallel betriebenen Blackboards.....	137
Abbildung 7-13: Failover-Mechanismus im Distributed Blackboard System (BB <sub>d</sub> ) .	138
Abbildung 7-14: Verteiltes Blackboardsystem (BB <sub>d</sub> ) als Datenaustauschplattform für einzelne räumliche und funktionale Bereiche einer Zellularen Fördertechnik..	140
Abbildung 8-1: Bereichsweise Blackboard-Zuweisung am Beispiel einer EHB-Anlage .....	145



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: SAIL-Funktionen nach [VDI/VDMA5100] .....	23
Tabelle 2-2: Beispielhafter Protokollstapel.....	29
Tabelle 2-3: C2C-CC Physical Layer.....	35
Tabelle 2-4: C2C-CC MAC/LCC Layer .....	36
Tabelle 3-1: Einsatzmöglichkeiten einer Zellularen Fördertechnik in logistischen Prozessen .....	45
Tabelle 3-2: Technische Anforderungen an die Fahrzeugsteuerung .....	51
Tabelle 3-3: Anforderungen an das Kommunikationssystem .....	55
Tabelle 4-1: Dynamik der Translation und der Rotation .....	59
Tabelle 6-1: Informationen der FTS-Steuerung [VDI2510] .....	79
Tabelle 6-2: Informationen nach [VDI/VDMA5100].....	79
Tabelle 6-3: Zusätzlicher Datenaustausch in dezentral gesteuerten Materialfluss- systemen .....	80
Tabelle 6-4: Informationsarten in Zellularen Transportsystemen.....	80
Tabelle 6-5: Kriterien zur Nachrichtenklassifizierung.....	83
Tabelle 6-6: Unterschiedliche drahtlose Kommunikationstechniken im Überblick (in Anlehnung an [Mat-2005], [Fin-2006], [Wil-2006] und [Krc-2010]) .....	93
Tabelle 6-7: Gewichtete Bewertung ausgewählter Funkstandards.....	106
Tabelle 7-1: Gegenüberstellung funktionaler Aspekte der (Single-)Blackboard- und Peer-to-Peer-Kommunikation (in Anlehnung an [Chi-2010, S. 67]) .....	124



# Abkürzungsverzeichnis

BB	Blackboard
BB <sub>1</sub>	Single Blackboard System
BB <sub>d</sub>	Distributed Blackboard System
CAN	Controller Area Network
DB	Datenbank
DF	Directory Facilitator
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DSRC	Dedicated Short Range Communications
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
ISA	International Society of Automation
ISO	Internationale Organisation für Normung
ITS	Intelligent Transport Systems
JADE	Java Agent Development Framework
MzW	Bereitstellprinzip Mann-zur-Ware
OOP	Objektorientierte Programmierung
OSI	Open Systems Interconnection
P2P	Peer to Peer
PC	Personal Computer
PROFIBUS	Process Field Bus
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Structured Query Language
TCP	Transmission Control Protocol
VANET	Vehicular Ad-hoc Network
WAVE	Wireless Access for Vehicular Environment
WLAN	Wireless Local Area Network
WzM	Bereitstellprinzip Ware-zum-Mann
XML	Extensible Markup Language
ZFT / ZTS	Zellulare Fördertechnik / Zellulares Transportsystem