

Von der Selbststeuerung zu Cyber Physischen Systemen

Scholz-Reiter, Bernd¹; Harjes, Florian²; Rippel, Daniel²

¹ Universität Bremen, Bibliothekstraße 1, 28359 Bremen

² BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH, Hochschulring 20, 28359 Bremen

1 Einleitung

Effiziente und robuste logistische Prozesse sind vor dem Hintergrund dynamischer Märkte und zunehmender Komplexität logistischer Systeme mit herkömmlichen Planungs- und Steuerungsmethoden immer schwieriger zu realisieren [1]. Dies liegt u. a. an marktorientierten Veränderungstreibern, wie der steigenden Kundenorientierung, einem hohen Individualisierungsgrad der Produkte sowie an sich ständig ändernden Kundenanforderungen. Diese Veränderungen führen unmittelbar zu einer raschen Steigerung der zeitlichen, organisatorischen und systematischen Komplexität logistischer Systeme [2]. Diese Komplexität erschwert zunehmend die zeitnahe Bereitstellung und Verarbeitung aller entscheidungsrelevanten Informationen für eine zentrale Planungs- und Steuerungsinstanz.

Aus diesem Grund beschäftigen sich aktuelle Forschungen mit der Entwicklung dezentraler Steuerungsstrategien und der dafür notwendigen Hard- und Software. Unter dem Schlagwort „4. industrielle Revolution“ rückt dabei die Entwicklung sogenannter Cyber Physischer Systeme (CPS) immer weiter in den Vordergrund. Diese Systeme zeichnen sich durch eine hochgradige Vernetzung und Integration dezentral organisierter, autonomer Teilsysteme aus. Der Grundgedanke entsprechender logistischer Systeme besteht darin, dass eine dezentrale Lösung einzelner Teilprobleme anhand lokal verfügbarer Informationen robuster und effizienter ist als die Lösung des Gesamtproblems durch eine zentrale Steuerungsinstanz. Hierdurch kann schneller auf Veränderungen im logistischen System, bspw. einer Änderung an einzelnen Aufträgen sowie der allgemeinen Auftragslage oder auf Maschinendefekte reagiert werden. Durch die dezentrale Entscheidungs- und Lösungskompetenz der Teilsysteme wird der Aufwand für Neuplanungen verringert und somit die Auswirkung einer Störung auf das Gesamtsystem begrenzt [3].

Ein solcher dezentraler Ansatz ist die Selbststeuerung logistischer Prozesse. Selbststeuernde logistische Prozesse sind durch eine Dezentralisierung von Entscheidungsfindungs- und Steuerungskompetenzen gekennzeichnet. Diese werden, weg von einer zentralen Steuerungsinstanz, hin zu den im Prozess beteiligten logistischen Objekten verlagert [3]. Hierzu werden diese logistischen Objekte, bspw. Stückgüter, Ladungsträger, Transportmittel oder Maschinen, um die Fähigkeiten zur Erfassung und Bewertung von entscheidungsrelevanten Umgebungsdaten und zur Kommunikation mit anderen logistischen Objekten innerhalb des Systems erweitert und somit zur autonomen Entscheidungsfindung innerhalb eines definierten Zielrahmens befähigt. Durch die Kooperation der unterschiedlichen, nun intelligenten, logistischen Objekte kann eine höhere Flexibilität und Robustheit sowie eine positive Emergenz des Gesamtsystems durch eine verteilte und flexible Bewältigung von Dynamik und Komplexität erreicht werden [4]. Die mit dieser Arbeit

gelegten Grundlagen zu Smart Object Systems [5] bilden den Anknüpfungs- und Ausgangspunkt für die künftige Entwicklung verteilter Planungs- und Steuerungsphilosophien. Während die ersten Smart Object Systems sich bereits im Praxistransfer befinden, ist die Entwicklung eines neuen Verständnisses von autonomen Systemen und deren Verhalten einer der Kernpunkte der aktuellen und zukünftigen Forschung.

2 Selbststeuerung in Produktion und Logistik

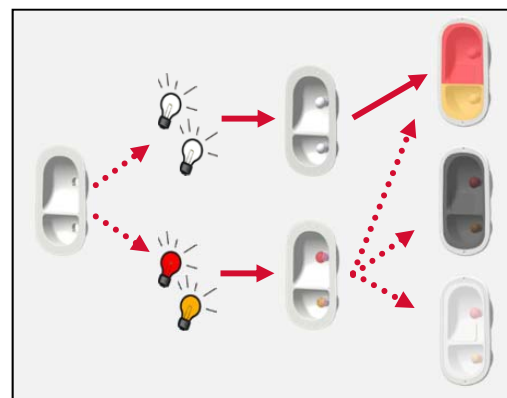
Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 637 „Selbststeuerung – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ (SFB 637) wurden in diesem Zusammenhang die Grundlagen für den Einsatz von Selbststeuerung durch intelligente Objekte in Produktions- und Transportszenarien erforscht. Das Forschungsspektrum reicht dabei von der Integration der notwendigen Informations- und Kommunikations-Technologien (IuK) in Werkstücke und andere systemrelevante Objekte [6], über die Entwicklung und Evaluation von Steuerungsmethoden [7] und Kommunikationsmechanismen, bis hin zur Entwicklung von Planungs- und Simulationswerkzeugen für selbststeuernde logistische Systeme unterschiedlicher Größenordnung [8]. Zur Überprüfung der Ergebnisse ausgewählter Projekte wurden diese begleitend in Transfer- und Demonstrator-Projekten auf ihre Anwendbarkeit in der Praxis hin überprüft.

2.1 Produktion

Als ein Resultat der Arbeiten im Sonderforschungsbereich entstand die „Fabrik der selbststeuernden Produkte“ (Abbildung 1a). Dieser produktionslogistische Demonstrator vereint die Ergebnisse verschiedener Teilprojekte und zeigt eine praxistaugliche Umsetzung der erarbeiteten Konzepte und Methoden. Der Demonstrator bildet einen Montageprozess für PKW-Rückleuchten ab, wobei es insgesamt fünf Bearbeitungsstationen und drei verschiedene Endvarianten für die Produkte gibt (Abbildung 1b) [9].



a) Demonstratoraufbau



b) Produktvarianten

Abbildung 1: Fabrik der selbststeuernden Produkte

Die Reflektorschalen werden anhand eines speziellen Druckgussverfahrens mit RFID-Transpondern ausgestattet, die eine eindeutige Identifikation des jeweiligen Produktes im laufenden Prozess ermöglichen [6]. Mithilfe der im Rahmen des SFB entwickelten Simulationsplattform PlaSMA (Platform for Simulation with Multiple Agents) [10] wird eine Repräsentation der Produkte, bzw. Produktvorstufen in der Fertigung als Agenten erzeugt und so eine autonome Entscheidungsfindung

ermöglicht. Die Entscheidungsalgorithmen der Produktvorstufen beziehen sowohl die aktuelle Auftragslage, die betrachtete Teilvariante, als auch die Belegung und Verfügbarkeit der einzelnen Bearbeitungsstationen in Betracht [11]. Jedes Produkt ordnet sich einem verfügbaren Auftrag zu und wählt dementsprechend den nächsten Produktionsschritt aus. Sollte ein geplanter Produktionsschritt nicht verfügbar sein, weil beispielsweise die Bearbeitungsstation defekt ist oder die notwendigen Komponenten nicht vorrätig sind, kann das Produkt eigenständig entscheiden, ob es einen anderen Produktionsschritt vorzieht oder sich einem anderen freien Auftrag zuordnet und somit seine Variante ändert. In jedem Fall werden möglichst höher priorisierte Aufträge von den Produkten bevorzugt. Auf diese Weise kann schnell und robust auf Änderungen im Produktionssystem reagiert werden. Darüber hinaus erlaubt die dynamische Zuordnung der Produkte zu Aufträgen eine schnelle und flexible Reaktion auf Änderungen im Auftragsbestand. Werden neue Aufträge hinzugefügt oder bestehende Aufträge modifiziert, können sich betroffene Objekte schnell neu zuordnen, um beispielsweise Eilaufträge zu erfüllen oder eine Überproduktion von nicht mehr nachgefragten Varianten zu vermeiden.

Neben solchen Steuerungsmethoden zur Auftrags- bzw. Variantenflexibilisierung wurden unterschiedliche bioanaloge, sowie routing-basierte Selbststeuerungsmethoden entwickelt und erprobt, die insbesondere auf die Auswahl der nächsten Bearbeitungsstation abzielen [12]. Im Fokus dieser Betrachtungen standen flexible Werkstattfertigungen, bei denen die intelligenten Objekte die Entscheidung sowohl über den nächsten Bearbeitungsschritt als auch zwischen verschiedenen möglichen Bearbeitungsstationen für die jeweiligen Schritte zu treffen hatten. Anhand dieser Strategien konnte mithilfe von Simulationsstudien gezeigt werden, dass selbststeuernde Systeme in besonders dynamischen Szenarien eine bessere logistische Leistung erzielen als zentral geplante Systeme (bspw. [7]).

2.2 Transport

Neben den produktionslogistischen Fragestellungen wurden auch unterschiedliche Fragestellungen im Bereich der Transportlogistik adressiert. Einige der Ergebnisse flossen hierbei in die Entwicklung des Intelligenten Containers ein [13]. Der Container verwendet ein sich selbst organisierendes, drahtloses Sensornetzwerk, um den Zustand verderblicher Fracht zu überwachen und dementsprechend Entscheidungen bezüglich der Transportroute zu treffen. Hierbei messen die im Container verteilten Sensoren die Temperatur an ihren aktuellen Positionen und übermitteln diese an die integrierte Telemetrie. Abhängig von den Messergebnissen passen die Sensoren ihre Messintervalle dynamisch an [14]. Hierbei werden Messfehler durch das Clustern der einzelnen Sensoren weitestgehend geglättet. Die erhobenen Messdaten werden genutzt, um die verbleibende Resthaltbarkeit der einzelnen Güter im Container zu prognostizieren [15].

Für die Transportplanung nutzt der Intelligente Container die Multiagentenplattform PlaSMA. Der entsprechende Agent holt Transportangebote bei verfügbaren Transportmitteln ein und übermittelt dabei seine Transportanforderungen. Anhand der geplanten Route kann der Intelligente Container so die beste Alternative bezüglich Zeit und Kosten auswählen. Neben internen Störungen, z. B. dem Ausfall eines Kühlaggregats, kann der Container, beispielsweise durch Lokalisierung, auch externe Störungen erkennen und darauf reagieren. Beispielsweise kann ein Stau dazu führen, dass neue Transportangebote eingeholt werden oder dass die Transportroute neu geplant wird.

Andere Ergebnisse führten im Rahmen des SFB 637 zu Methoden einer selbststeuernden, kollaborativen Tourenplanung (bspw. [16]). Das Ziel dieser Arbeiten war es, die Routenplanung für

miteinander kooperierende Speditionen zu verbessern. Der Grundgedanke liegt im Austausch von, für die jeweiligen Unternehmen ungünstigen Transportaufträgen. Hierzu wurde ein selbststeuerndes Auktionssystem entworfen, in dem die kooperierenden Speditionen ihre Transportaufträge einstellen können. Die anderen Partner können für jeden dieser Aufträge im Auktionsverfahren Angebote unterbreiten, um dadurch sowohl ihre eigene Auslastung, als auch die Leistung des gesamten Netzwerks zu steigern [17].

3 Transfer in die Praxis

Neben der prototypischen Umsetzung in Form von Demonstratoren findet eine praxisnahe Evaluation der erarbeiteten Selbststeuerungsmethoden im Rahmen von Transferprojekten statt. Diese ermöglichen eine anwendungsbezogene Erprobung der Selbststeuerungsansätze in vielfältigen Szenarien aus unterschiedlichen Geschäftsbereichen. Die in den Jahren zwischen 2004 und 2008 durchgeführten Transferprojekte betrachteten beispielsweise Anwendungsfälle aus der Bekleidungsindustrie [18] und der Automobillogistik [19].

Seit Anfang des Jahres 2012 betrachtet das Transferprojekt 6 die Anwendung, Evaluation und Weiterentwicklung von Selbststeuerungsmethoden für eine selbststeuernde Disposition und Transportplanung im Umlaufmanagement von Verleihartikeln. Praxispartner ist ein mittelständisches Unternehmen aus dem Bereich des Veranstaltungsmanagements. Zum Geschäftsfeld des Unternehmens gehören alle Dienstleistungen, die sich mit der Organisation und Durchführung von Veranstaltungen, wie Konzerten oder Firmenjubiläen befassen. Der Leistungsumfang beinhaltet unter anderem den Verleih der Veranstaltungsausrüstung, beispielsweise Technik und Mobiliar sowie den Auf- und Abbau der Verleihartikel. Die mit der Veranstaltungsdurchführung verbundenen Logistikprozesse stellen aufgrund hoher Kundenanforderungen bezüglich der Termintreue, der Flexibilität, des Preis/Leistungs-Verhältnisses und der Artikelqualität eine große Herausforderung dar. Zudem erfordern sich ändernde Kundenwünsche sowie defekte Artikel oftmals eine Neuallokation von Artikeln, woraufhin eine Neuplanung der Transportrouten, der Beladungspläne und der Personalzuweisung notwendig wird.

Vor diesem Hintergrund befasst sich das Transferprojekt mit der Anwendung von Selbststeuerungsmethoden zur Handhabung von inhärenten Zielkonflikten in der dynamischen Auftragsdisposition und -steuerung innerhalb des geschlossenen Logistiksystems des Partnerunternehmens. Zielsetzung des Projektes ist hierbei die Entwicklung eines selbststeuernden Dispositionssystems für das Umlaufmanagement der Verleihartikel einschließlich der Tourenplanung.

3.1 Ist-Analyse und Soll-Prozess

Im ersten Schritt des Transferprojekts wurden die aktuellen Prozesse des Unternehmens aufgenommen und analysiert. Aktuell werden alle Prozesse zentral am Hauptlager des Unternehmens gesteuert, dementsprechend haben alle Informations- und Materialflüsse hier ihren Ursprung. Die Abwicklung einer Veranstaltung umfasst in der Regel fünf Stufen, von der Grobplanung nach dem Auftragseingang (Stufe 1), über die künstlerische Vorplanung (Stufe 2), die Feinplanung (Stufe 3) sowie schließlich die Realisierung dieser Vorplanungen inklusive Transport und Disposition (Stufe 4), bis zur Durchführung am Veranstaltungsort (Stufe 5).

Die im Rahmen des Transferprojektes betrachteten Dispositionsvorgänge finden in den Stufen drei bis fünf statt. Hier wird entsprechend der künstlerischen Vorplanung die konkrete

Ressourcenallokation vorgenommen. Diese ordnet den Veranstaltungen bestimmte Artikel, Transportmittel und das benötigte Personal zu. Zu den Planungsergebnissen gehören die Kommissionier- und Ladelisten, die Zuweisung der jeweiligen Fahrzeuge sowie die genaue Routenführung zum Veranstaltungsort. Die Ressourcenverteilung wird durch einen erfahrenen Experten vorgenommen, der während der Vorbereitung und Durchführung als Projektleiter fungiert. Dieser wird durch die Verantwortlichen der Teilbereiche Transport und Technik unterstützt. Die informationstechnische Abwicklung erfolgt durch ein Enterprise Resource Planning System (ERP-System), das über zusätzliche Projektplanungs- und Abrechnungsfunktionen verfügt.

Die Kombination aus zentralen Planungsprozessen und der Abhängigkeit von Expertenwissen führt beim Auftreten dynamischer Ereignisse zu vielfältigen Komplikationen. Eilaufträge oder Änderungen bestehender Veranstaltungsparameter sowie Diebstähle oder Defekte stellen die Verantwortlichen bei der Planung vor große Herausforderungen. Die häufige Neuplanung von Transportrouten und Ladungen führt in der betrieblichen Praxis oftmals zu der Notwendigkeit, Ausrüstung oder Transportmittel anmieten zu müssen, während parallel bereits disponierte Transporte freie Kapazitäten aufweisen oder Bestandsartikel verfügbar wären.

Aufbauend auf einer detaillierten Ist-Analyse der Planungs- und Dispositionsprozesse im Partnerunternehmen wurde ein Sollprozess entworfen, welcher die verschiedenen Herausforderungen mithilfe von, im Rahmen des SFB 637 entworfenen Selbststeuerungsmethoden adressiert [20]. Dieser Sollprozess fungiert im weiteren Projektverlauf als Grundlage für die Implementierung eines dynamischen und auftragsorientierten Dispositionssystems, welches die oben skizzierten Probleme durch eine dezentralisierte Entscheidungsfindung besser handhabbar und robuster gestalten soll. Hierbei orientiert sich der selbststeuernde Soll-Prozess am bereits etablierten Stufenmodell für die Projektabwicklung im Anwendungsfall. Die wesentlichen Prozessanpassungen finden dort statt, wo Ressourcen erstmalig disponiert oder bestehende Allokationen aufgrund veränderter Auftragsparameter angepasst werden. An diesen Punkten der Veranstaltungsplanung und -durchführung werden die bisher allein durch den Projektleiter als Planungsexperten getroffenen Entscheidungen durch selbststeuernde, dezentrale Verhandlungen zwischen den beteiligten logistischen Objekten, bzw. Ressourcen (Artikel, Transporter, Personal) unterstützt, um eine flexiblere und robustere Planung zu ermöglichen. Diese Verhandlungen finden zwischen Softwareagenten statt, die die beteiligten Ressourcen innerhalb einer Multiagentensimulation repräsentieren. Die Identifikation der zu betrachtenden Ressourcen entstammt direkt der Prozessaufnahme, die Definition des Soll-Prozesses beinhaltet ein Konzept für die Abbildung der beteiligten Ressourcen als unabhängige, selbststeuernde Objekte. Tabelle 1 fasst die expliziten Problemstellungen sowie die Lösungsansätze zusammen.

Tabelle 1: Problemstellung im Teilprojekt und Lösungsansätze

| Prozessschritt | Aufgabe | Herausforderungen | Lösungsansatz |
|-----------------------------------|--|---|--|
| 1. Grobplanung | Keine Allokation von Ressourcen, daher nicht im Projektfokus | | |
| 2. Künstlerische Vorplanung | | | |
| 3. Feinplanung | <ul style="list-style-type: none"> - Allokation von Ressourcen zu Aufträgen - Transportplanung | <ul style="list-style-type: none"> - Komplexes Planungsproblem durch Artikelanzahl und wechselnde Veranstaltungsorte - Fehlende oder defekte Artikel - Mangelnde Informationstransparenz | <ul style="list-style-type: none"> - Verhandlungsbasierter Ansatz zur dezentralen Allokation durch Softwareagenten (PlaSMA) - Selbststeuernde Routenplanung (DLRP, PlaSMA) - Prozessüberwachung |
| 4. Realisierung | <ul style="list-style-type: none"> - Disposition - Transport | <ul style="list-style-type: none"> - Verkehrssituation - Pickup and Delivery Problem - Routen- und Tourenplanung | <ul style="list-style-type: none"> - Selbststeuernde Routenplanung (DLRP, PlaSMA) |
| 5. Durchführung der Veranstaltung | <ul style="list-style-type: none"> - Dokumentation der Ladevorgänge | <ul style="list-style-type: none"> - Fehlende oder defekte Artikel - Intransparente Ladevorgänge | <ul style="list-style-type: none"> - Automatisierte Dokumentation der Be- und Entladevorgänge - Aktuelle, elektronische Bestandsführung |

3.2 Selbststeuernde Allokation von Ressourcen und Transportplanung

Die softwaretechnische Umsetzung des Dispositionssystems findet, wie beim Projekt „Intelligenter Container“, auf Basis der Multiagentensimulation PlaSMA statt. Innerhalb der Simulation werden die im Hinblick auf die Ressourcenallokation relevanten Objekte als Softwareagenten repräsentiert. Diese verfügen über individuelle Fähigkeiten, Kenntnisse und Ziele. Die Zuweisung der Artikel zu Veranstaltungen und Transportmitteln erfolgt nun über Verhandlungen der korrespondierenden Agenten innerhalb der Simulation. Als Ergebnis eines Simulationslaufes stehen im Anschluss Kommissionier- und Ladelisten, sowie Personal- und Routenpläne zur Verfügung. Eine Neuallokation wegen veränderter Rahmenbedingungen kann jederzeit durch einen erneuten Simulationslauf durchgeführt werden. Hierbei werden die zu berücksichtigenden Veränderungen als Modifikationen des, der Simulation zugrundeliegenden Szenarios umgesetzt.

Die Entscheidungsgrundlage der selbststeuernden Objekte setzt sich aus den Auftragsdaten sowie den im laufenden Betrieb akquirierten Daten zusammen. Aus dem bereits im Einsatz befindlichen ERP-System werden die Rahmenbedingungen des Auftrages übernommen. Dies sind im Wesentlichen Veranstaltungsort und -zeit. In Kombination mit den Pufferzeiten für Transport, Aufbau und Abbau der Ausrüstung ergeben sich hieraus die primären Plandaten für die Abwicklung der logistischen Prozesse. Die grobe Vorplanung für die Zuordnung der Ausrüstung ergibt sich aus Gesprächen mit dem Kunden und Besichtigungen des Veranstaltungsortes. Diese Vorplanung wird in Gestalt einer Artikelliste an die Simulation übergeben. In Anlehnung an die Organisation der

Bestandsdaten im ERP-System, werden in der Vorabauflistung nur Artikelfamilien benannt. Hier sind beispielsweise der Artikelfamilie „Mikrophone“ verschiedene Geräte zugeordnet. Die Detaillierung dieser Zusammenstellung findet in der Simulation statt, Ergebnis ist die Bestimmung des konkreten Gerätes für jeden Punkt der Artikelliste. Die konkrete Auflistung der Geräte wird nun als Grundlage für die Verhandlungen zwischen den Agenten der Transportmittel verwendet, hier werden in einem Angebots- und Nachfrageverfahren die Geräte auf die vorhandenen Transportkapazitäten verteilt. Korrespondierend werden die Fahrer der Transportmittel und das notwendige Personal für den Auf- und Abbau sowie den Betrieb der Geräte zugewiesen. Die Planung der Routen für die Transporte von und zu sowie zwischen den einzelnen Veranstaltungsorten, wird unter Verwendung des DLRP (Distributed Logistics Routing Protocol), einem im SFB 637 entwickelten Protokoll, durchgeführt. Dieses Protokoll überträgt die Vorgänge beim Routing von Datenpaketen durch die dezentralen Strukturen großer Datennetze, wie beispielsweise dem Internet, auf die Wegfindung autonomer Objekte in logistischen Netzwerken [21]. In der PlaSMA-Simulation wird die Vorgehensweise des DLRP bei der Tourenplanung als Verhalten der Transportmittelagenten implementiert.

3.3 Prozessüberwachung

Die Akquise der für die Simulationen notwendigen Informationen bezüglich der Standorte der nachgefragten Artikel findet sowohl zentral am Lager, als auch dezentral an den Veranstaltungsorten statt. Ersteres wird über RFID-Gates an den Laderampen realisiert. Für die Erfassung der Ladevorgänge außerhalb des Zentrallagers beinhaltet das Transferprojekt die Entwicklung eines Hardwareprototyps für den mobilen Einsatz direkt vor Ort. Der Prototyp wird an der Ladebordwand angebracht und verfügt über ein RFID-Lesegerät zur Identifikation der bewegten Artikel, einen GPS-Sender zur Lokalisation, einen UMTS-Router zur Datenübertragung und eine Einheit zur Datenverarbeitung. Für die Unterscheidung von Be- und Entladevorgängen sind zudem Bewegungssensoren integriert. Die Materialbewegungen können so direkt am Fahrzeug erfasst und dokumentiert werden. Die Dokumentation umfasst hierbei eine Liste der aus- und eingeladenen Artikel inkl. der zugehörigen Positionsdaten. So können bei der Disposition von Folgeaufträgen und der zugehörigen Routenplanung die jeweils aktuellen Standorte der Artikel und der Transportfahrzeuge berücksichtigt werden. Zusammen mit den Daten am Warenein- und -ausgang des Lagers entsteht so eine komplette und transparente Abbildung der Materialflüsse. Die mobile Ausführung des Prototyps ermöglicht eine schnelle Montage und Demontage, um ihn auch in angemieteten Fahrzeugen einsetzen zu können. Eine dauerhafte Montage ist nur an den firmeneigenen Fahrzeugen der Flotte möglich und vorgesehen. Eine mögliche Variante für das Moduldesign und die Montageposition des Prototyps sind in Abbildung 3 zu sehen.

Die optimale Ausführung für das Partnerunternehmen wird in umfangreichen Testläufen ermittelt. Hierbei wird beispielsweise unter Laborbedingungen betrachtet, wie die RFID-Antenne auszurichten ist, um eine möglichst zuverlässige Erfassung der bewegten Artikel zu erreichen. Ferner wird die Erkennung der Ladungsrichtung mittels der integrierten Bewegungssensoren untersucht und eine erste Abschätzung der Robustheit und Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten vorgenommen. Das Zusammenspiel der Komponenten wird in Feldtests unter Realbedingungen untersucht.

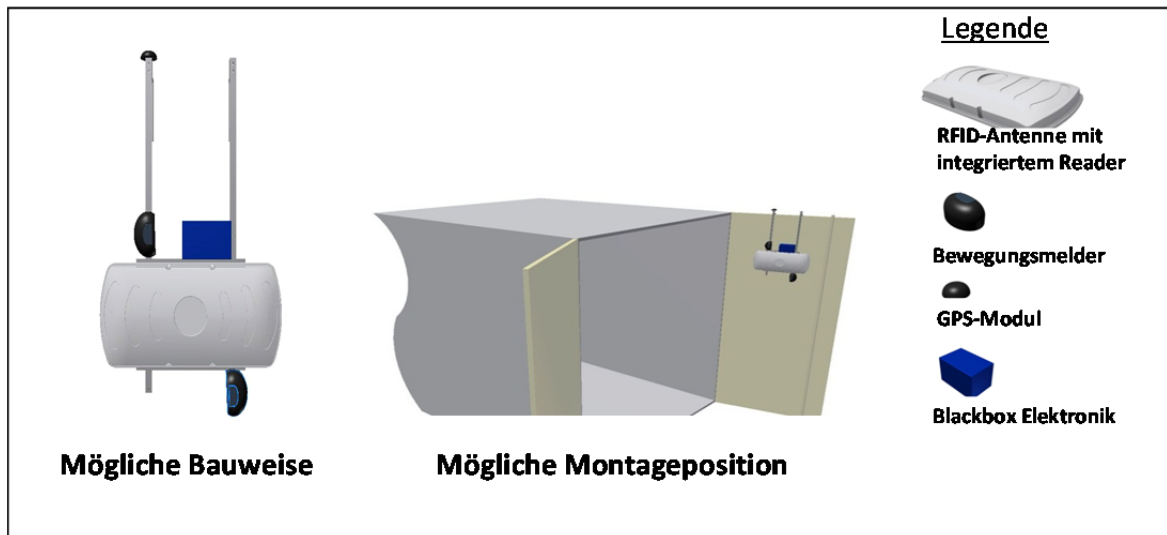


Abbildung 3: Mögliche Bauweise und Montageposition des Hardwaremoduls

3.4 Systemarchitektur

Die Kombination dieser RFID-basierten Lösung zur Prozessüberwachung und der selbststeuernden Allokation und Tourenplanung ergibt die in Abbildung 4 dargestellte Systemarchitektur. Die direkt an den Veranstaltungsorten akquirierten Daten hinsichtlich der Materialflüsse werden vor Ort aufbereitet und in einer XML-Datei über das Mobilfunknetz an einen Dateiserver gesendet. Kann die Übertragung aufgrund der Verbindungsstärke oder -qualität nicht unmittelbar nach der Aufzeichnung erfolgen, werden die Daten aggregiert und übermittelt, sobald die Verbindung dies wieder zulässt. Nach dem Empfang werden die Daten in eine SQL-Datenbank übertragen, auf die die PlaSMA-Simulation Zugriff nehmen kann. Die Rahmendaten der Projekte werden aus dem ERP-System des Industriepartners übernommen. Für die Verwendung in anderen Unternehmen kann die Eingabe und Verwaltung der Projektdaten über eine eigens dafür entwickelte Oberfläche erfolgen. Diese ist in der Lage, sowohl für die Simulation relevante Daten aufzunehmen, als auch die erzeugten Planungsergebnisse auszugeben. Die Ausgabe an die Mitarbeiter erfolgt hierbei nach Zuständigkeiten aufgeschlüsselt. Während der Projektleiter Zugriff auf den kompletten Umfang der Ergebnisse besitzt, werden die Lade- und Kommissionierlisten nur dem Lagerpersonal und die Fahrtrouten nur den Fahrern zugänglich gemacht.

Ergebnis ist eine flexible, adaptive und zugleich robuste Planung, die alle Teilbereiche, von der Beladungsplanung über die Festlegung der Fahrstrecken bis zum Personaleinsatz, erfasst. Mittelpunkt zukünftiger Projekte ist die Weiterentwicklung des selbststeuernden Distributionssystems für den Einsatz in ähnlich gelagerten Kreisläufen von Umlaufartikeln. Mögliche Ansatzpunkte wären beispielsweise die Disposition von Ladungsträgern in Fertigungsbereichen einzelner Unternehmen oder in firmenübergreifenden Logistiknetzen. Weiterhin bieten die praktischen Erfahrungen mit dem Einsatz intelligenter Objekte die Grundlagen für ein weitergehendes Verständnis des Verhaltens verteilter autonomer Systeme, die als Zukunftsperspektive in der Entwicklung einer neuen Generation von verteilten autonomen Systemen, den Cyber Physischen Systemen münden.

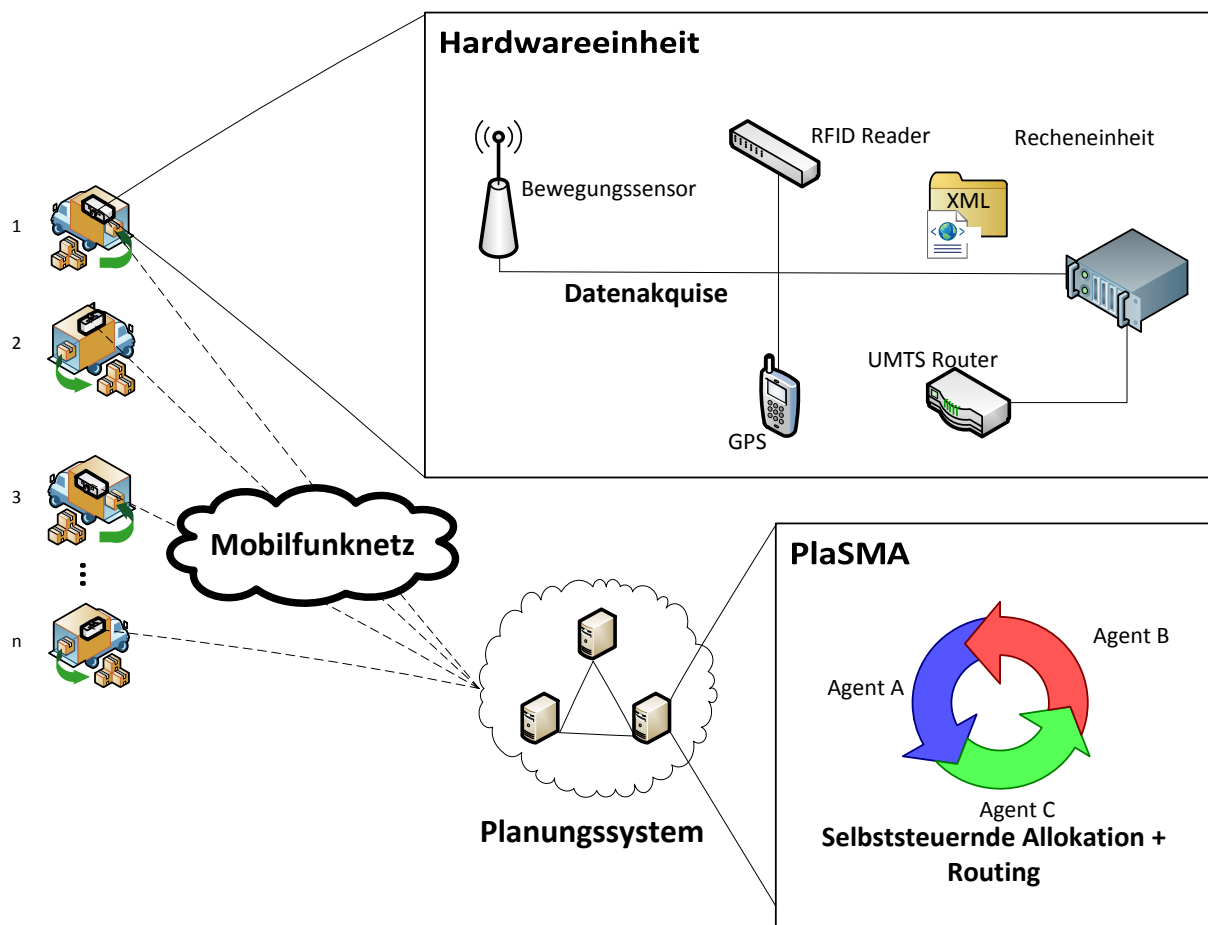


Abbildung 4: Architektur des selbststeuernden Dispositionssystems

4 Perspektiven autonomer verteilter Systeme

Cyber Physische Systeme sind hoch komplexe Produktionsstrukturen, die zu einem wesentlichen Anteil auf dem Grundgedanken der Integration und Kommunikation der beteiligten Teilsysteme beruhen. Die entstehenden Strukturen vereinen die Welt der physischen Systemkomponenten mit einer virtuellen Repräsentation und bedürfen daher neuer Konzepte für die Systemkonzeption und -steuerung. Aktuelle Forschungsprojekte beschäftigen sich daher auf der Ebene der Systemgestaltung mit der Definition von Referenzstrukturen [22]. Diese sollen über einen strukturierten und modularen Aufbau die Skalierbarkeit und Adaptivität der zukünftigen Cyber Physischen Systeme sicherstellen. Ein Eckpunkt dieser Arbeiten ist die Entwicklung entsprechender Schnittstellen für die vernetzte Integration bestehender Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS), Enterprise Resource Planning (ERP) und anderen industriell eingesetzten Softwaresystemen. Weiterhin sind die proprietären Datenformate und -strukturen der heterogenen Datenquellen aus Maschinen, Sensoren, Werkstückträgern, virtuellen Instanzen oder Distributionssystemen zu integrieren und eindeutig interpretierbar zu machen. Hierzu gehört der Entwurf von syntaktischen und semantischen Regularien für ein übergreifendes und einheitliches Verständnis der Daten auch und gerade in verteilten Systemen über Prozess- und Systemgrenzen hinweg.

In Kompetenz- und Transferzentren werden daher die in den Arbeiten zur Thematik der Selbststeuerung erarbeiteten Grundlagen autonomer verteilter Systeme sowie erste Praxiserfahrungen aus den Transferprojekten aufgearbeitet und in Richtung Cyber Physischer Systeme vorangetrieben (Abbildung 4). Diese können somit als weitere Evolutionsstufe autonomer Systeme intelligenter Objekte verstanden werden, deren Entwicklung sich durch einen zunehmenden Grad der Vernetzung und eine steigende Anzahl beteiligter Teilsysteme definiert.

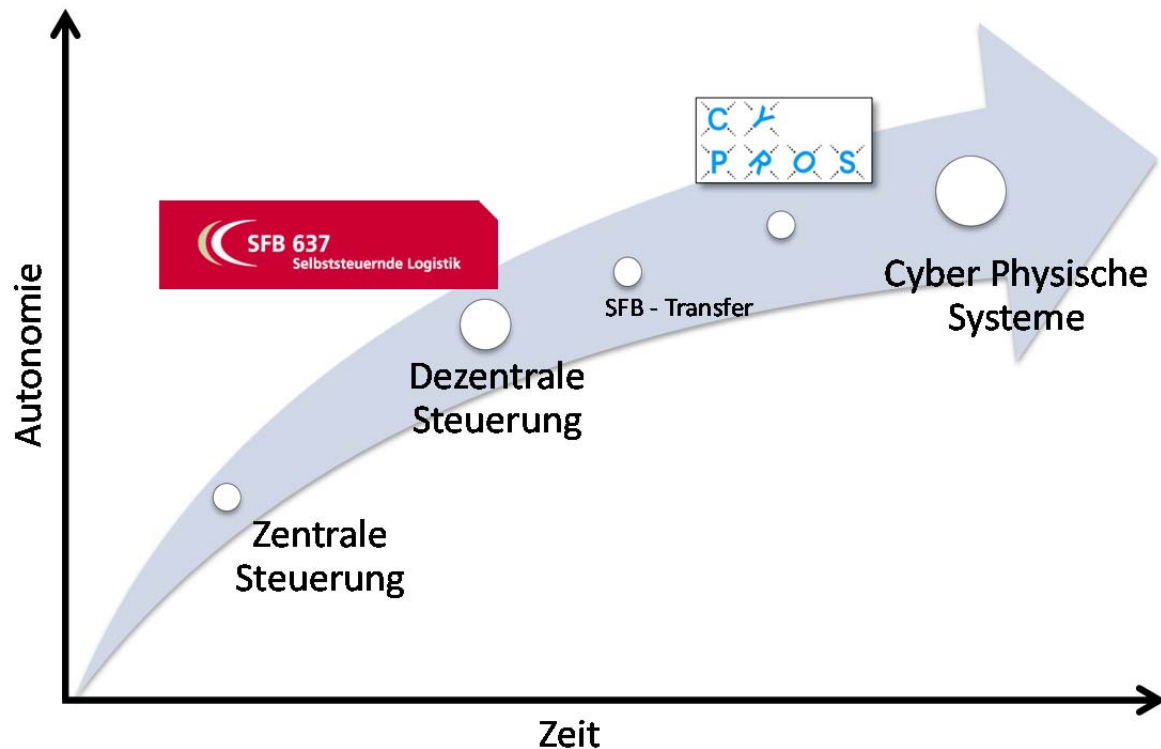


Abbildung 4: Entwicklung in Richtung Cyber Physischer Systeme

Das Projekt CyProS (Cyber-Physische Produktionssysteme – Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik) betrachtet hierbei beispielsweise Methoden und Werkzeuge für die Entwicklung und den Betrieb von Cyber Physischen Systemen. Neben den eingangs erwähnten Referenzstrukturen und Schnittstellen werden industrierelevante Szenarien mit dem Ziel untersucht, Anforderungen an Produktion und Logistik auf Basis von CPS abzuleiten. Die Implementierung und Validierung der erzielten Ergebnisse erfolgt in den Transfer- und Kompetenzzentren sowie in der industriellen Anwendung. Die dem Projekt zugrundeliegende Definition von CPS geht dabei von physischen Objekten aus, die durch eingebettete Systeme sowie ggf. Aktuatoren und Sensoren in die Lage versetzt werden, Informationen zu erfassen, über den Cyberspace (Netzwerke wie das Internet) zu verteilen beziehungsweise zu erhalten und daraufhin Entscheidungen zu treffen und auszuführen [22, 23]. Die Möglichkeit einer dezentralen Datenverarbeitung und -nutzung ermöglicht eine dynamische Informationserfassung, die Verteilung der Informationen mittels intelligenter Vernetzung und somit eine Synchronisation der Material- und Informationsflüsse. Sogenannte Schaufensterfabriken veranschaulichen die erzielten Ergebnisse in der Anwendung und bringen sie einer breiten Öffentlichkeit nah [22].

5 Zusammenfassung

Globale Trends hin zu kundenindividuellen Produkten und kürzeren Lieferzeiten führen gemeinsam mit einem steigenden Kosten- und Effizienzdruck zu einem deutlich verschärften Wettbewerb. Einen Lösungsansatz für den Umgang mit diesen Herausforderungen bietet der Einsatz von Smart Object Systems in Kombination mit dezentralen Steuerungsansätzen. Hier ermöglicht die weitreichende Verfügbarkeit eingebetteter Systeme im Umfeld von Produktion und Logistik bereits heute eine flexible und robuste Prozessgestaltung in industriellen Anwendungsgebieten. Durch die konsequente Weiterentwicklung der bestehenden dezentralen Ansätze in Richtung Cyber Physischer Systeme kann dieser Trend im Sinne einer nachhaltigen und kontinuierlichen Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen in Deutschland fortgesetzt werden.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 637 „Selbststeuerung – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ wurden diverse Methoden und Techniken erforscht, welche als Grundlagen und Anknüpfungspunkte die Entwicklung von Cyber Physischen Systemen unterstützen. Im Rahmen von Simulationsstudien, Demonstratoren und Transferprojekten wurde gezeigt, dass der Einsatz von dezentralen Entscheidungsmethoden für autonome und intelligente Objekte insbesondere im Hinblick auf die Flexibilität und Robustheit der logistischen Systeme Vorteile gegenüber zentralen Steuerungsmethoden mit sich bringt.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen konzentriert sich die Forschung aktuell auf die Adaption und Weiterentwicklung dieser Grundlagen für industrielle Einsatzzwecke, sowie den Aufbau von Kompetenzzentren, in denen die Weiterentwicklung und Umsetzung von Cyber Physischen Systemen vorangetrieben wird.

6 Danksagung

Dieser Beitrag entstand unter Förderung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 637 – Teilprojekt T6.

7 Literatur

- [1] Scholz-Reiter, B., Windt, K., und Freitag, M., *Autonomous logistic processes: New demands and first approaches*, in *Proc. of the 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, L. Monostori, Editor 2004, Hungarian Academy of Science: Budapest. S. 357 - 362.
- [2] Abele, E. und Reinhart, G., *Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*, 2011, München: Hanser Verlag.
- [3] Windt, K., Böse, F., und Philipp, T., *Autonomy in production logistics: Identification, characterisation and application*. *International Journal of Robotics and CIM*, 2008. **24**(2): S. 572 - 578.
- [4] Windt, K. und Hülsmann, M., *Changing Paradigms in Logistics - Understanding the Shift from Conventional Control to Autonomous Cooperation and Control*, in *Understanding Autonomous Cooperation & Control - The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication, and Material Flow*, K. Windt and M. Hülsmann, Editors. 2007, Springer Verlag: Berlin. S. 4-16.
- [5] Sanchez López, T., Ranasinghe, D., Patkai, B., und McFarlane, D., *Taxonomy, technology and applications of smart objects*. *Information Systems Frontiers*, 2011. **13**(2): S. 281 - 300.
- [6] Pille, C., *In-Process-Embedding of Piezo Sensors and RFID Transponders into Cast Parts for Autonomous Manufacturing Logistics*. in *Smart Systems Integration 2010. 4th European*

- Conference & Exhibition on Integration Issues of Miniaturized Systems*. 2010. Berlin: VDE Verlag GmbH.
- [7] Scholz-Reiter, B., Rekersbrink, H., und Görge, M., *Dynamic Flexible Flow Shop Problems - Scheduling Heuristics vs. Autonomous Control*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2010. **59**(1): S. 465 - 468.
- [8] Scholz-Reiter, B., Rippel, D., und Sowade, S., *A Concept for Simulation of Autonomous Logistic Processes*. International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, 2011. **5**(3): S. 324 - 333.
- [9] Ganji, F., Morales Kluge, E., und Scholz-Reiter, B. *Bringing Agents into Application: Intelligent Products in Autonomous Logistics*. in *Artificial Intelligence and Logistics (AiLog) - Workshop at ECAI 2010*. 2010. Lissabon, Portugal.
- [10] Gehrke, J.D., Herzog, O., Langer, H., Malaka, R., Porzel, R., und Warden, T., *An Agent-Based Approach to Autonomous Logistic Processes*. Künstliche Intelligenz, 2010. **24**(2): S. 137 - 141.
- [11] Hribernik, K., Pille, C., Jeken, O., Thoben, K.-D., Windt, K., und Busse, M. *Autonomous control of intelligent products in beginning of life processes*. in *Proceedings of the 7th International Conference on Product Lifecycle Management*. 2010. Bremen.
- [12] Windt, K., Becker, T., Jeken, O., und Gelessus, A., *A classification pattern for autonomous control methods in logistics*. Logistics Research, 2010. **2**(2): S. 109 -120.
- [13] Jedermann, R., Behrens, C., Laur, R., und Lang, W., *Intelligent containers and sensor networks, Approaches to apply autonomous cooperation on systems with limited resources*, in *Understanding Autonomous Cooperation & Control in Logistics - The Impact on Management, Information and Communication and Material Flow*, M. Hülsmann and K. Windt, Editors. 2007, Springer Verlag: Berlin. S. 365 - 392.
- [14] Wang, X., Jabbari, A., Laur, R., und Lang, W. *Dynamic Control of Data Measurement Intervals in a Networked Sensing System*. in *7th International Conference on Networked Sensing Systems*. 2010.
- [15] Lang, W., Jedermann, R., Mrugala, D., Jabbari, A., Krieg-Brückner, B., und Schill, K., *The Intelligent Container - A Cognitive Sensor Network for Transport Management*. IEEE Sensors Journal Special Issue on Cognitive Sensor Networks, 2011. **11**(3): S. 688 - 698.
- [16] Bloos, M., Schönberger, J., und Kopfer, H., *Supporting Cooperative Demand Fulfillment in Supply Networks Using Autonomous Control and Multi-Agent-Systems*, in *INFORMATIK 2009. Im Focus das Leben. Beiträge der 39. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)*, S. Fischer, E. Maehle, and R. Reischuk, Editors. 2009, Gesellschaft für Informatik e.V. : Bonn S. 3590 - 3604.
- [17] Kopfer, H., Schönberger, J., und Bloos, M., *Groupage Systems - Collaborative Request Fulfillment in Road Haulage: A procedural View*, in *Dimensionen der Logistik: Funktionen, Institutionen und Handlungsebenen*, R. Schönberger and R. Elbert, Editors. 2010, Gabler Verlag: Wiesbaden. S. 787 - 804.
- [18] Scholz-Reiter, B., Sowade, S., Rippel, D., Teucke, M., Özsahin, M., und Hildebrandt, T., *A Contribution to the Application of Autonomous Control in Manufacturing*. International Journal of Computers, 2009. **3**(3): S. 279 -291.
- [19] Scholz-Reiter, B., Ruthenbeck, C., Teucke, M., und Hoppert, J., *Limitations of Autonomous Control in Practical Applications: Report on Lessons Learned from Vehicle and Apparel Logistics*, in *Autonomous Cooperation and Control in Logistics*, M. Hülsmann, B. Scholz-Reiter, and K. Windt, Editors. 2011, Springer: Heidelberg. S. 291 - 311.
- [20] Harjes, F. und Scholz-Reiter, B., *Autonomous Control in Event Logistics*, in *Proceedings of the 11th International Conference on Modeling and Applied Simulation 2012*, M. Affenzeller, et al., Editors. 2012, DIME, University of Genoa: Rende. S. 302 - 308.
- [21] Rekersbrink, H., Makuschewitz, T., und Scholz-Reiter, B., *A distributed routing concept for vehicle routing problems*. Logistics Research, 2009. **1**(1): S. 45 - 52.
- [22] Reinhart, G., Engelhardt, P., Geiger, F., Philipp, T.R., Wahlster, W., Zühlke, D., Schlick, J., Becker, T., Löckelt, M., Pirvu, B., Stephan, P., Hodek, S., Scholz-Reiter, B., Thoben, K.-D., Gorldt, C., Hribernik, K.A., Lappe, D., und Veigt, M., *Cyber-Physische Produktionssysteme -*

Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. wt Werkstattstechnik online, 2013. **103**(2): S. 84 - 89.

- [23] Broy, M.G., E., *Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems, agendaCPS*, in *acatech Studie 2012* 2012, acatech: München.