

# Feldstudie zu einer FTS-Auftragsvergabe für die dezentral gesteuerte Produktionsversorgung in cyber-physischen Produktionssystemen

Field study on an automated guided vehicle system contract award for decentrally controlled production supply in cyber-physical production systems

**Dominik Borst**  
**Haci Bayhan**  
**Michael Ratke**  
**Michael ten Hompel**

*Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen  
Fakultät Maschinenbau  
Technische Universität Dortmund*

**Cyber-physische Produktionssysteme (CPPS), die durch Kopplung mehrerer autonom agierender und über das Internet miteinander vernetzter und kooperierender cyber-physischer Systeme (CPS) entstehen, bieten Ansätze zur Realisierung vollflexibler Produktion. Es wird ein Produktionsfeld mit autonomen, sich in Echtzeit optimierenden, transparenten und vollständig wandlungsfähigen Strukturen geschaffen, das durch dezentrale Entscheidungsfindung, Vernetzung und vollständige Einbettung aller beteiligten Komponenten geprägt ist. Die wesentliche Herausforderung einer dezentralen Steuerung der Produktionsversorgung in CPPS besteht in einer gesteigerten Komplexität, da alle Entitäten die Möglichkeit haben, Entscheidungen selbstständig zu treffen. Sie nehmen die Rolle von Entscheidungsträgern ein. Es wird eine universelle Organisationsstruktur für die Entscheidungsfindung am Fahrerlosen Transportsystem evaluiert, die diese gesteigerte Komplexität handhaben kann.**

*[Schlüsselwörter: Produktionsversorgung, cyber-physische Systeme, dezentral, Fahrerloses Transportsystem]*

**Cyber-physical production systems (CPPS), which are created by coupling several autonomously acting cyber-physical systems (CPS) that are networked and cooperating with each other via the Internet, offer approaches for the realization of fully flexible production. A production environment with autonomous, real-time optimized, transparent and fully adaptable structures is created, which is characterized by decentralized decision making, networking and complete embedding of all involved components. The main challenge of decentralized control of production supply in CPPS is increased complexity, as all entities are able to make their own decisions. They take on the role of decision makers. A universal or-**

**ganizational structure for decision making in the Automated Guided Vehicle System will be evaluated that can handle this increased complexity.**

*[Keywords: production supply, cyber-physical systems, decentral, automated guided vehicle system]*

## 1 EINLEITUNG

Produzierende Unternehmen stehen vor der Herausforderung den steigenden Kundenwünschen nach individualisierten Produkten sowie kurzen Lieferzeiten gerecht zu werden. Die hierdurch gegebene Komplexität betrieblicher Abläufe resultiert in einer Planungsunsicherheit und Störungsanfälligkeit [KH10]. Zur Bewältigung dieser Herausforderungen werden robuste sowie wandlungsfähige Systeme benötigt. Eine Lösung ist ein dezentraler Ansatz mit cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS). Solche Systeme erhöhen die Flexibilität und können autonom auf die Komplexität reagieren.

Das Internet der Dinge (IoT), als Teil von Industrie 4.0, ermöglicht die Vernetzung und Zusammenarbeit der im Produktionsumfeld agierenden Menschen und Maschinen. Durch diese Kommunikationsinfrastruktur ergeben sich neue Möglichkeiten, die eben genannten Herausforderungen anzugehen. Der Verbund aus mechanischen, elektronischen und informationstechnischen Komponenten wird als cyber-physisches System (CPS) bezeichnet [Bau14]. Die so vernetzten Systeme agieren autonom und kollaborieren miteinander, wodurch sie in der Lage, sind sich selbst zu organisieren. Um dies zu erreichen, werden die im Produktionsfeld vorhandenen Entitäten mit Sensoren, Mikrochips und Funktechnik ausgestattet [SBS<sup>+</sup>19]. So sind Erfassung und Austausch von Daten in Echtzeit möglich. Mit dieser Technik können die Entitäten Entscheidungen auf lokaler Ebene treffen und beispielsweise

auf Störungen reagieren. Durch die dezentrale Selbststeuerung bietet es sich an CPS ins Produktionsfeld zu integrieren, um so Entscheidungen auf Bediener Ebene zu reduzieren. Diese Integration ist folgend als CPPS bezeichnet.

Im Gegensatz zu determinierten und geplanten Produktionssystemen ist es schwer bis unmöglich aufgrund der Autonomie das Systemverhalten von CPPS zu prognostizieren [SBS<sup>+</sup>19]. Starre Produktionsabfolgen werden von dynamischen Systementscheidungen abgelöst. Ohne feste Auftragsreihenfolge ist eine Betrachtung der Prozessfolgen aus ablauflogischer Sicht notwendig, die durch Vorranggraphen beschrieben ist. Ein Produkt kann verschiedene Wege durch das Produktionsfeld nehmen, was in einer gesteigerten Komplexität resultiert und für Anwender schlecht nachvollziehbar ist. Ein allgemeingültiger Ansatz der Organisationsstruktur, der für unterschiedlichste Entitäten anwendbar ist, wird erforderlich. Diesen Ansatz ermöglicht das Contract Net Protocol, das in diesem Beitrag evaluiert wird.

In dem Kontext dynamischer Systementscheidungen ist es notwendig, ein Konzept der Selbststeuerung und Produktionsversorgung zu entwickeln, welches den Anforderungen der Dezentralität gerecht wird. Das bedeutet, dass dieses Konzept der flexiblen und wandlungsfähigen CPPS-Umgebung gerecht wird. Zur Überprüfung erfolgt ein Feldversuch am Fahrerlosen Transportsystem (FTS).

Dieser Beitrag beschreibt in Abschnitt 2 die Architektur des am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen der TU Dortmund entwickelten CPPS und geht auf die besonderen Anforderungen für das FTS ein, die in die, in Abschnitt 3 beschriebene, konkrete FTS-Implementierung einfließen. Abschnitt 4 stellt das Versuchsfeld dar, das die Grundlage der Datenaufnahme und Evaluation in Abschnitt 5 bildet. Abschnitt 6 schließt den Beitrag mit dem Fazit und einem Ausblick ab.

## 2 ARCHITEKTUR DES CPPS

Die Architektur des CPPS gliedert sich in mehrere Entitätsklassen. Neben dem FTS, bilden der Auftragsagent, die Arbeitsstationen, die Mitarbeiter und die Kleinladungsträger (KLT) das Gesamtbild des CPPS, wie Abbildung 1 zeigt.

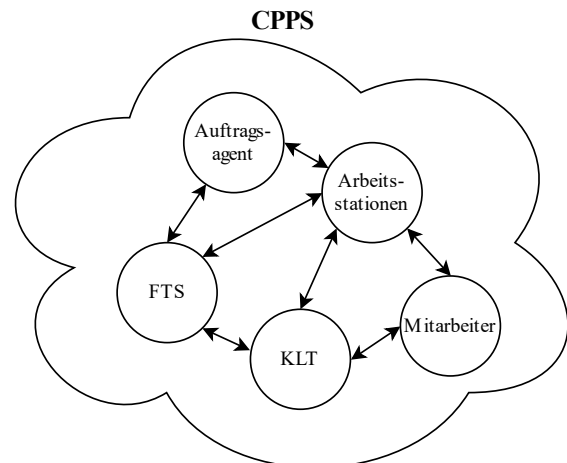


Abbildung 1. Die im CPPS auftretenden Entitätsklassen

Die Ausgangsbasis eines jeden Auftrags (zur Fertigung eines Produktes) bildet der *Auftragsagent*. Dieser initiiert die Prozessschritte und koordiniert den Gesamtprozess für das spezifische Produkt. Jeder Auftragsagent ist Teil des Multiagentensystems. Durch das Zusammenspiel mit dem FTS können mehrere Auftragsagenten initialisiert werden. Die Anzahl der parallel arbeitenden Auftragsagenten hängt dabei von der im FTS zur Verfügung stehenden Auftragsroboter ab. Im weiteren Verlauf übernimmt der Auftragsagent die Rolle des Auftraggebers.

Jede *Arbeitsstation* bildet den zentralen Punkt eines Fertigungsschrittes. Über verschiedene Kriterien, die die Fähigkeiten einer Arbeitsstation darstellen, werden Angebotsanfragen von den Auftragsagenten gestellt. Sind die Kriterien einer Arbeitsstation nicht erfüllt, wird die Anfrage verworfen. Alle übrigen Arbeitsstationen leiten die Anfrage an die übrigen Entitätsklassen weiter, um einen frühestmöglichen Termin untereinander auszuhandeln. Die Ergebnisse bilden einen Entscheidungsbaum für den Auftragsagenten, der die Zusage nach der Berechnung eines Bewertungsergebnisses erteilt.

Die Entitätsklasse der *Mitarbeiter* stellt die Schnittstelle für die Mensch-Maschinen-Interaktion dar. Entscheidungen unter den Entitätsklassen werden über einen Belegungskalender dem Mitarbeiter zur Verfügung gestellt. Dieser übernimmt die Planung eines Mitarbeiteragenten, der ebenfalls im FTS und für die Arbeitsstationen eingesetzt wird. Unter anderem entscheidet die Fähigkeit eines Mitarbeiters, ob für den angeforderten Prozessschritt eine Zu- oder Absage erteilt wird.

Die für die Produktionsschritte benötigten Komponenten werden von der *KLT-Klasse* ermittelt. Während KLT und FTS den Transport aushandeln, kommissioniert ein Mitarbeiter gemäß des angefragten Produktionsschrittes. Dabei ist darauf zu achten, dass ein KLT vor der ausgehandelten Abholzeit fertig kommissioniert ist.

Das FTS ist in zwei Gruppen unterteilt. Auf der einen Seite übernehmen die Auftragsroboter die Beförderung für den Auftragsagenten und begleiten das zu fertigende Produkt auf deren Entwicklungsweg. Auf der anderen Seite dienen die Transportroboter der Bereitstellung der benötigten Komponenten. Die Fähigkeit eines Roboters wird zu Beginn fest definiert, kann jedoch im weiteren Verlauf geändert werden. Trifft demnach also eine Transportanfrage von einem KLT ein, so entsteht eine Situation, in der es für das FTS eine Entscheidung zu finden gilt. Entweder erstellt ein FTF sein Angebot oder der Auftrag wird abgelehnt. Kriterien für diese Entscheidung lassen sich in KO-Kriterien, wie maximale Traglast und Ladestatus der Batterie, sowie Leistungsparameter, wie Transportdauer und Verfügbarkeit zum gegebenen Zeitpunkt, unterscheiden. Wenn eines oder mehrere dieser Kriterien nicht erfüllt werden und mindestens eines davon ein KO-Kriterium ist, so erstellt das FTF kein Angebot. Es kehrt demnach in einen wartenden Zustand zurück. Bei Erfüllung der Kriterien gibt das FTF ein Angebot ab, das dann ein Auslöser für eine weitere Entscheidungssituation ist. Nach einer Verhandlung anhand verschiedener Kriterien (multikriteriell) erhält ein FTF den Auftrag.

Jede der beschriebenen Entitätsklassen kann beliebig hoch skaliert werden. Wird eine Entität in das CPPS hinzugefügt, so beginnt diese in einem wartenden Zustand, der erst beendet wird, wenn eine Anfrage für einen neuen Prozessschritt eingeht. Zusätzlich verfügt jede Entität über die Möglichkeit selbstständig Entscheidungen zu treffen, die multikriteriell ermittelt sind. Sie werden somit zu Entscheidungsträgern.

Die Skalierbarkeit und das Aushandeln von Entscheidungen steigern die Komplexität, wodurch neue Ansätze zur Implementierung dezentraler Systeme benötigt werden. Offene Fragen lauten: Auf welcher Weise kommunizieren die Entitäten? Welche Informationen sind nötig ausgetauscht zu werden? Die Herausforderung besteht darin, eine sichere Kommunikation aufzubauen, ohne überschüssigen Datenverkehr zu produzieren. Das Contract Net Protocol bietet sich als Methodik an, diese Herausforderungen zu lösen. Hierbei handelt es sich um ein Protokoll, das vertragsbasiert Aufgaben verteilt. Dieser Prozess besteht aus einer Auftraggeber-Dienstleister-Kommunikation und ist in mehrere Phasen unterteilt, die in Abbildung 2 dargestellt sind.

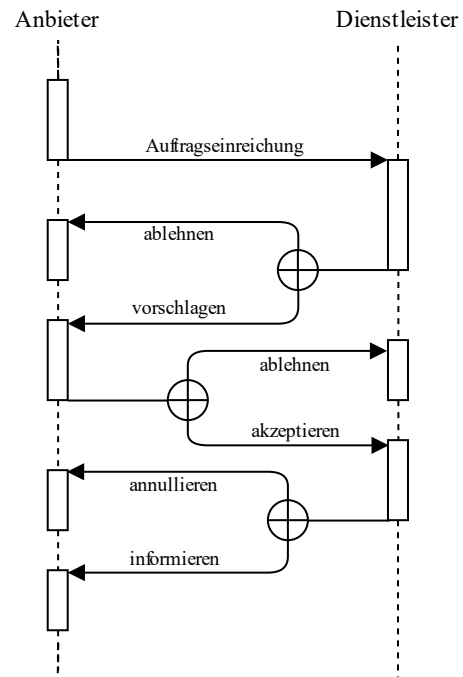


Abbildung 2. Für das CPPS verwendete Contract Net Protocol [vgl. FIPA02]

Im ersten Schritt reicht der Auftraggeber eine Anfrage ein, auf welche sich die potenziellen Dienstleister bewerben oder absagen können. Bei der Bewerbung geben die Dienstleister kennzahlbasiert ein Angebot ab. Der Auftraggeber entscheidet sich dann für das beste Angebot und antwortet dementsprechend mit Zu- oder Absagen. Der Dienstleister, der den Zuschlag erhielt, quittiert daraufhin den Auftrag oder kann diesen, beispielsweise bei einer Fehlfunktion, annullieren. In diesem Fall beginnt der Auswahlprozess erneut [FIPA02]. Durch die Methode der vertragsbasierten Auftragsvergabe entsteht eine robuste Kommunikationsstruktur. Indem das Vergabeverfahren nur potenzielle Dienstleister anfragt, wird der überschüssige Datenverkehr geringgehalten.

Neben der Methodik, „wie“ die Entitäten kommunizieren, gilt es die Angebote zu harmonisieren, da jeder Agent mehrere Angebote, bei unterschiedlichen Kombinationen, für einen Prozessschritt abgeben kann. Da in einer Entitätskombination jede Entität unterschiedliche Startzeiten aufweisen kann, ist es erforderlich den frühesten gemeinsamen Starttermin zu finden. Für die Harmonisierung muss für den Kalender eine dynamische Datenstruktur gewählt werden, die außerdem schnell Vergleiche zwischen den Vorgängern und Nachfolgern einer möglichen Belegung durchführen kann. Außerdem muss eine hohe Flexibilität gewährleistet werden, die durch das Reservieren und Buchen eines Auftrags entstehen kann. Die Wahl fiel auf die Doppelt Verkettete Liste, die unter dem englischen Namen Double Linked List (DLL) bekannt ist. Die Entscheidung ermöglicht die Umsetzung der geforderten Herausforderungen.

### 3 AUFBAU DES FLOTTENMANAGEMENT-SYSTEMS

Die formal definierten Methoden werden durch bekannte softwaretechnische Ansätze auf das FTS angepasst und implementiert.

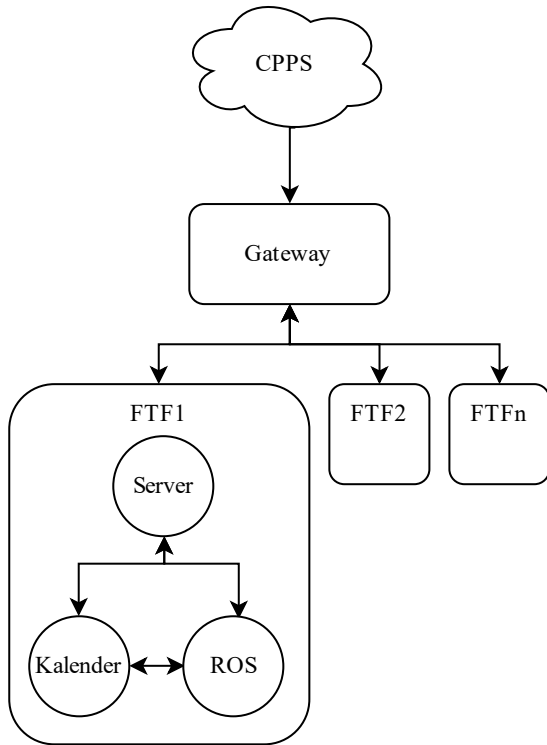


Abbildung 3. Hierarchie der logischen Agenten des FTS

Abbildung 3 zeigt die abstrakte Darstellung des Flottenmanagement-Systems (FMS). Die zwei grundlegenden Strukturierungsprinzipien des FMS sind die Schichtenarchitektur und das sogenannte Self Contained System (SCS), die allgemein unter dem Begriff Microservices bekannt sind. Im Gegensatz zu Microservices ist die SCS-Architektur genau definiert [SCS19]. Das Besondere eines SCS ist, dass es komplett unabhängig von anderen Systemen läuft. Drei Kriterien spielen dabei für diese Eigenschaft eine wichtige Rolle. Durch das Bereitstellen eines selbständigen User Interface, in Form einer grafischen Benutzerschnittstelle, wird dem Benutzer ein separater Zugang zum System ermöglicht. Die eigene Business-Logik und die Datenarchivierung laufen losgelöst von anderen Systemen und stehen nur der eigenen Anwendung zur Verfügung. Somit erfolgt die Bereitstellung der Daten nur mittels der definierten Kommunikationswege. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die Dezentralität innerhalb des FMS zu erhöhen und beliebig zu skalieren. Jedes FTF ist nach dem SCS-Prinzip implementiert.

Über die Serverschicht stellt das FMS eine Programmierschnittstelle (API) anderen Entitätsklassen zur Verfügung. Die Kommunikation mit der Programmierschnittstelle erfolgt über das http-Protokoll nach dem RESTful Prinzip. Dies ermöglicht eine zustandslose und asynchrone

Kommunikation [RR07]. Die Nachrichten werden im JSON-Format ausgetauscht. Das Hauptkriterium der Programmierschnittstelle ist die Bereitstellung der Funktionen des Kalenders eines FTF. Anfragen an das FMS werden bearbeitet und an die darunterliegende Schicht des Gateways weiter gereicht. Sind Anfragen an einen Kalender eines FTF adressiert, werden diese vom Gateway über das Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) Protokoll an einzelne beziehungsweise alle FTF versendet. Das MQTT-Protokoll funktioniert nach dem Publisher-/Subscriber-Prinzip. Nachrichten werden über sogenannte Topics vom Publisher an die Subscriber mitgeteilt [MQTT18]. Dabei agiert das FMS als Publisher und alle FTF als Subscriber. Die Topics des FMS bestimmen, an wen genau die Zustellung einer Nachricht erfolgt.

Der Kalender des FTF stellt die Kernfunktionalität dar, indem er die Koordination übernimmt. Neben diesem ermöglicht eine Programmierschnittstelle die Verwaltung und Steuerung, die zum Beispiel über eine per Web abrufbare, grafische Benutzeroberfläche erfolgt. Wird eine Anfrage an den Kalender gestellt, sucht dieser mittels eines Algorithmus in seiner Datenstruktur nach einer passenden Belegung. Die Datenstruktur ist durch die DLL aufgebaut und ermöglicht eine dynamische Verwaltung der Aufträge, wie in Abbildung 4 gezeigt wird.

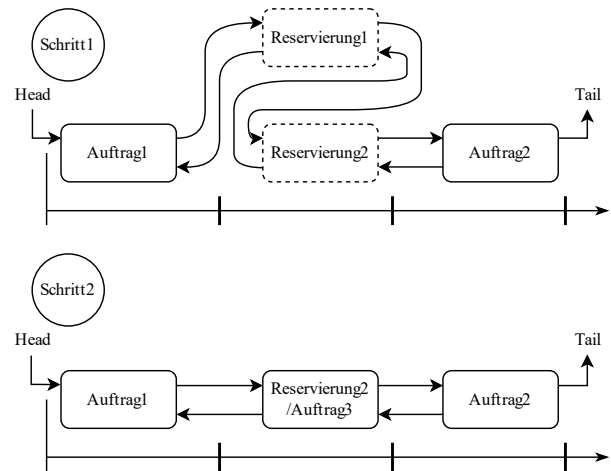


Abbildung 4. Funktionsweise des Kalenders

Eine Anfrage enthält, neben einigen Parametern, den gewünschten Bereitstellungstermin des Auftrags. Der Kalender antwortet mit dem nächstmöglichen Bereitstellungstermin. Dabei kann dieser eine Abweichung zum gewünschten Bereitstellungstermin aufweisen, wenn sich zum Zeitpunkt ein anderer Auftrag in Bearbeitung befindet. Für jeden Auftrag werden alle auftragsspezifischen Zeiten mit einberechnet. Dazu zählt unter anderem die Einplanung der Fahrzeit vom Startpunkt bis zum Ziel. Eine Anfrage gilt vorerst als reserviert und muss im weiteren Schritt vom Auftraggeber bestätigt und gebucht werden. Erfolgen mehrere Anfragen für ein und denselben Prozessschritt, werden diese parallel reserviert, um den gewünschten Bereitstellungstermin nicht zu blockieren. Wird ein Auftrag gebucht,

verfallen alle anderen parallel reservierten Aufträge für den Prozessschritt und es bleibt ein einziger Auftrag im Kalender gespeichert. Das Ergebnis wird dem Gateway mitgeteilt. Der Kalender bildet somit die Basis des FTF und beeinflusst damit dessen Verfügbarkeit. Im weiteren Verlauf arbeitet das FTF die im Kalender gebuchten Aufträge nach ihrer Startzeit ab. Dadurch bildet der Kalender eine intelligente Auftragsplanung.

Während des Anbieterprozesses sammelt das Gateway die Gebote aller FTF und berechnet den optimalen Kandidaten. Durch eine Absage an die übrigen FTF werden die restlichen Ergebnisse verworfen und das optimale Ergebnis an den Auftraggeber als Response Message über die Serverschnitt zurückgesendet. Dieses Prinzip ermöglicht eine parallele Bearbeitung mehrerer Aufträge sowie Vorausplanung zukünftiger Aufträge.

#### 4 CPPS IN DEM VERSUCHSFELD

Um die Auswirkungen des CPPS untersuchen zu können, erfolgt die Übertragung in ein reales Versuchsfeld. Das folgende Kapitel beschreibt den physischen Aufbau im Forschungszentrum des Innovationslabors Hybride Dienstleistung [Fra18]. Dieser Aufbau wird genutzt, um ein Produktionsversorgungszenario durchzuführen. Folgend wird die technische Ausstattung des Versuchsfeldes [ZBV+17] und insbesondere das zu betrachtende Szenario vorgestellt.

##### 4.1 VERSUCHSAUFBAU

Zur Verfügung steht ein L x B / 22 m x 10 m großes Versuchsfeld, in der sich die in Abschnitt 2 beschriebenen Entitätsklassen wiederfinden. Das Feld ist in Kommissionier- und Produktionsbereich unterteilt. Im Kommissionierbereich befindet sich ein Mitarbeiter, der Kleinladungsträger (KLT) zur Produktionsversorgung vorbereitet. Die KLT sind mit intelligenten Einsteckkarten, sogenannten PhyNodes, ausgerüstet. Sie ermöglichen den Informationsaustausch untereinander, mit anderen Klassen und dem Menschen, wodurch die KLT Teil des CPPS werden [VRR+15]. Fertig kommissionierte KLT sind dadurch in der Lage dezentrale Transportaufträge an das FTS zu senden. Im Produktionsbereich befinden sich Mitarbeiter, Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) und Arbeitsstationen. Vier *Mitarbeiter* in diesem Bereich sind für die Durchführung der manuellen Tätigkeiten zuständig. Für die erforderliche Mensch-Maschine-Interaktion verfügen sie über ein Assistenzsystem. Zugangsgaräte wie Smartphones ermöglichen die Integration des Menschen in das CPPS. Mit diesem können die Mitarbeiter Auftragsanfragen bearbeiten oder beispielsweise dynamisch ihre Pausen nehmen. Eine Betrachtung der kognitiven Ergonomie des Assistenzsystems oder der Auswahl geeigneter Zugangsgaräte findet in diesem Beitrag nicht statt.

Der Materialtransport ist durch ein *FTS* realisiert, das auf dem Fahrzeugtyp RB1-Base des Herstellers Robotnik

basiert. Um Transportaufträge durchzuführen, sind sie mit einer Lastaufnahme, bestehend aus Hubvorrichtung und Zentrierkegeln, erweitert. Dadurch sind die Fahrzeuge in der Lage an Objekten mit konischen Gegenständen anzudocken und zum Transport anzuheben. Im Forschungszentrum stehen vier FTF zur Verfügung. Sie weisen die in Tabelle 1 dargestellten Spezifikationen auf [Rob19].

Tabelle 1. Spezifikationen der eingesetzten FTF

|                      |   |
|----------------------|---|
| Dimensionen (d x h)  | Ø 515 x 303 mm  |
| Hub                  | 25 mm   |
| Eigengewicht         | 30 kg   |
| max. Traglast        | 50 kg   |
| max. Geschwindigkeit | 1,5 m/s   |
| CPU                  | Intel i7 4. Gen   |
| Kommunikation        | WiFi 802.11n  |
| Steuerung            | Robot Operating System (ROS) auf einem eingebetteten System mit Linux |

Sieben *Arbeitsstationen* fungieren als Montagearbeitsplätze. Da zum aktuellen Zeitpunkt die Implementierung eingebetteter Hardware für die Arbeitsstationen geplant ist, übernimmt zusätzlich ein virtueller Agent die Kommunikation mit den anderen Entitäten. Stationen sind mobil konzipiert und besitzen eine Transportschnittstelle für die FTF. Dies ermöglicht die Reorganisation des Produktionslayouts durch die Mitarbeiter oder durch das System. Da für diesen Beitrag die Effekte des CPPS auf das FTS untersucht werden, wird ein Referenzlayout angefertigt, welches innerhalb der Versuchsdurchführungen unverändert bleibt. Abbildung 5 skizziert schematisch ein solches Layout. Es werden mögliche Positionen für Kommissionier- und Produktionsbereich angedeutet und die Anordnung der Entitäten in ihnen. Die Skizze dient als Orientierung, wobei die repräsentierten Entitäten skalierbar sind.

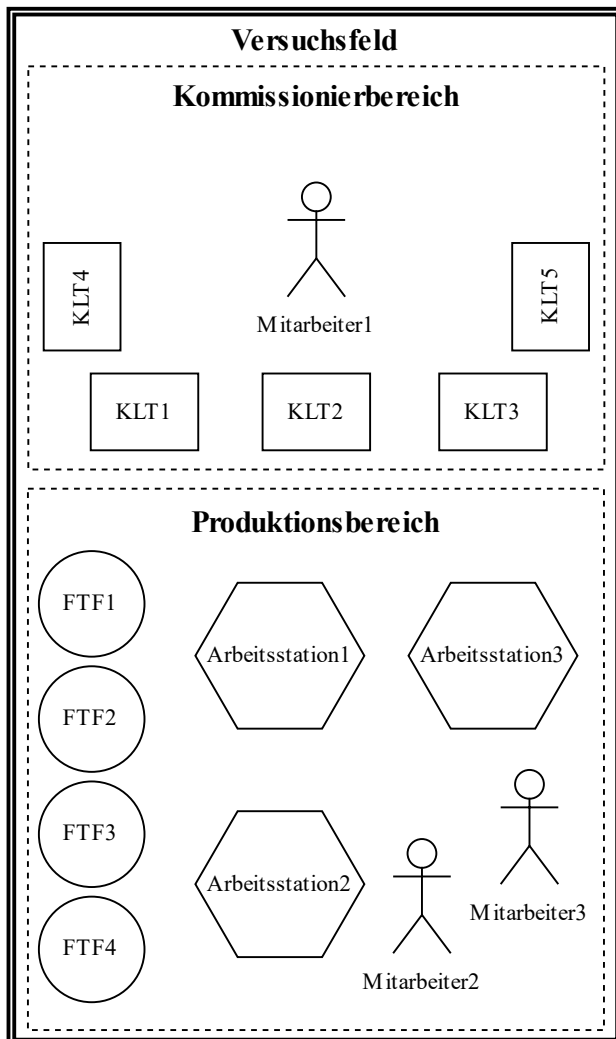


Abbildung 5. Schematische Darstellung des Versuchsfeldes

Während der Versuchsdurchführung beobachten 40 Motion Capturing Kameras die komplette Fläche und stellen damit eines der größten europäischen Systeme dieser Art dar. Zur Positionserfassung wird an jeder Entität ein einzigartiges Muster, bestehend aus drei bis vier passiven Markern angebracht. Dies führt zur eindeutigen Identifizierung und Lokalisierung in Echtzeit. Die so aufgenommenen Positionsdaten fließen in die Auftragsvergabe mit ein und werden zum anderen für die Auswertung gebraucht, da in der Aufzeichnung framegenau die Prozessdauer bestimmt werden kann.

#### 4.2 PRODUKTIONSVERSORGUNGSSZENARIO

Das im folgenden beschriebenen Szenario zeigt einen beispielhaften Produktionsprozess, anhand einer Drohnenmontage, welche aus modularen Steckbausteinen besteht. Dieser Aufbau dient dazu eine individuelle Konfiguration nach den Wünschen des Kunden zu simulieren. Bei gleichbleibender Produktart kann eine große Variantenvielfalt erzeugt werden. In diesem Beitrag ist die Vielfalt durch die Anzahl der Antriebsmotoren und die Farbwahl bestimmter

Bauteile beschränkt. Der Kunde kann sich in einem Konfigurator zwischen Quadro- oder Hexacopter entscheiden und die Farben der in Abbildung 6 beschrifteten Bauteile auswählen. Parallel werden dem Kunden die Änderungen an einem virtuellen Modell zeitgleich angezeigt.

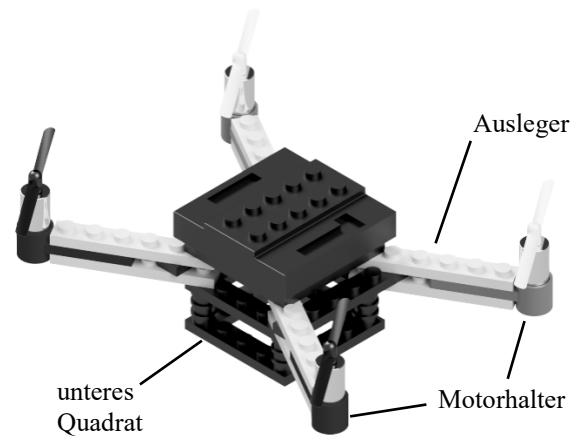


Abbildung 6. Modellansicht der konfigurierbaren Drohne als Quadrocopter

Final ergeben sich 24 unterschiedliche Drohnenvarianten mit den wählbaren Ausprägungen:

- Quadro- oder Hexacopter
- Ausleger in gelb oder schwarz
- Motorhalter in blau-rot, blau-weiß oder rot-weiß
- Unteres Quadrat in grau oder schwarz

Um den Produktionsprozess abstrahiert darzustellen, werden die einzelnen Montageschritte aus der Bauanleitung extrahiert und in einen Vorranggraphen übertragen. Der Vorranggraph repräsentiert die Menge aller Schritte (auch Knoten genannt) sowie die Vor- und Nachfolgebziehungen [Bul93]. Das CPPS entscheidet an jedem Knoten anhand der bekannten Parameter die bestmögliche Entitätskombination und bestimmt damit welcher Folgeknoten der geeignetste ist. Der Bediener kann hier Einfluss auf die Auswahl nehmen, indem das Maß der Zeit- oder Produktionskostenpriorität justierbar ist. Dies resultiert in einem dynamischen Produktionsprozess. Der finale Vorranggraph mit den konkreten Knoten ist in Abbildung 7 dargestellt. In der Darstellung werden den Knoten der Buchstabe *K* mit einer eindeutigen Nummer zugewiesen.

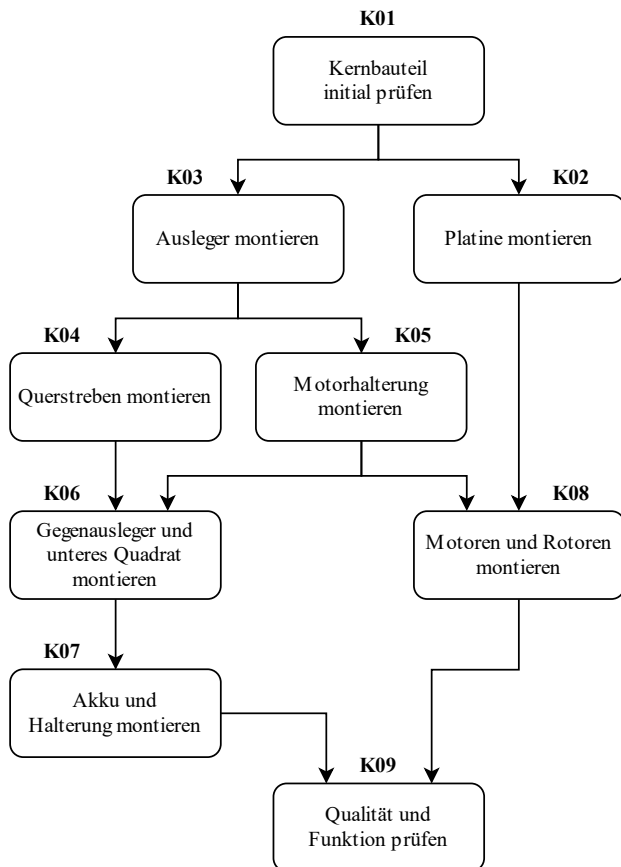
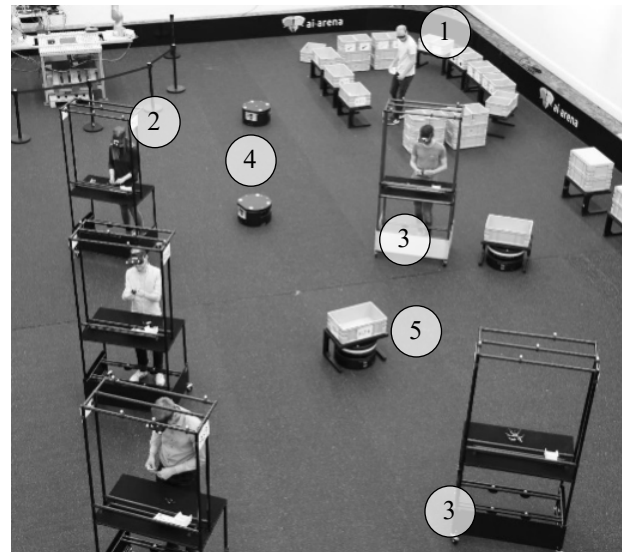


Abbildung 7. Vorranggraph zur Drohnenmontage

Die Knoten werden als Fähigkeiten den Arbeitsstationen zugeordnet, von denen jede Station aber nur zwei bis drei erhält. Dies führt dazu, dass die komplette Montage nicht an einer einzigen Station durchgeführt werden kann und die Drohne einen Weg durch den Produktionsbereich finden muss. Die Fähigkeitsverteilung ist an einer realen Montage angelehnt, bei der jeder Prozessschritt andere Werkzeuge oder Maschinen benötigt. Da der Einfluss der Fähigkeitsverteilung in der Versuchsdurchführung nicht betrachtet wird, ist darauf zu achten, dass alle Knoten verteilt sind, um die Fertigstellung zu ermöglichen.

Da die durchgeführten Versuche das FTS isoliert betrachten und anhand der gemessenen Dauer evaluieren, werden die jeweiligen Montagezeiten als konstant festgelegt. Dies bedeutet, dass während der Datenaufnahme keine physischen Drohnen zusammengebaut werden, da die manuellen Tätigkeiten zeitlichen Schwankungen unterliegen und sich auf die Messergebnisse auswirken.

Das vollständig aufgebaute Versuchsfeld zeigt Abbildung 8. Durch das komplexe Zusammenspiel der in diesem Abschnitt beschriebenen Klassen werden nicht alle Einheiten des Demonstrators genutzt.



- 1 Mitarbeiter im Kommissionierbereich
- 2 Mitarbeiter im Produktionsbereich
- 3 Arbeitsstation
- 4 FTF
- 5 FTF + KLT

Abbildung 8. CPPS-Versuchsaufbau im Innovationslabor des FLW

## 5 DATENAUFNAHME UND EVALUATION DES CPPS

In dem zuvor beschriebenen Versuchsfeld werden zwei Aspekte des FTS im CPPS untersucht. Es folgt eingangs eine Datenaufnahme zur Flexibilität. Im ersten Versuch variiert die Anzahl der eingesetzten FTF. Beginnend mit der minimal benötigten Anzahl von zwei FTF wird nach erfolgreichem Durchlauf eins hinzugefügt. Ein Durchlauf besteht aus fünf Bestellungen. Gemessen wird die Dauer, die das FTS benötigt, um alle Transporte bis zur geplanten Fertigstellung des Produktes durchzuführen. Der Versuch evaluiert die Flexibilität auf Produktionsschwankungen reagieren zu können und zeigt, ob die vertragsbasierte Auftragsvergabe des *Contract Net Protocol* die Anforderungen der Skalierbarkeit erfüllt. In Abbildung 9 ist der Verlauf der Gesamtdauer im Verhältnis der eingesetzten FTF-Menge aufgezeigt. Deutlich zu sehen, ist die hohe Dauer bei zwei eingesetzten FTF, die aus den auftretenden Wartezeiten resultiert. Durch die Zunahme an FTF reduzieren sich die Wartezeiten und die Gesamtdauer geht in die Sättigung über. Dabei wird die Anzahl an Auftrags- und Transportrobotern gleich groß gehalten. Eine Ausnahme stellen die Versuche mit ungerader FTF-Anzahl dar. Um Engpässe zu vermeiden, befindet sich hier ein weiterer Transportroboter im Versuchsfeld.

Da im Versuchsfeld nur vier FTF zur Verfügung stehen, wurden die Daten parallel simulativ ermittelt, um das Verhalten bei steigenden FTF-Mengen abschätzen zu können. Die simulierten Daten besitzen eine hohe Validität,

weil sie sich mit den vorhandenen experimentell ermittelten Daten decken.

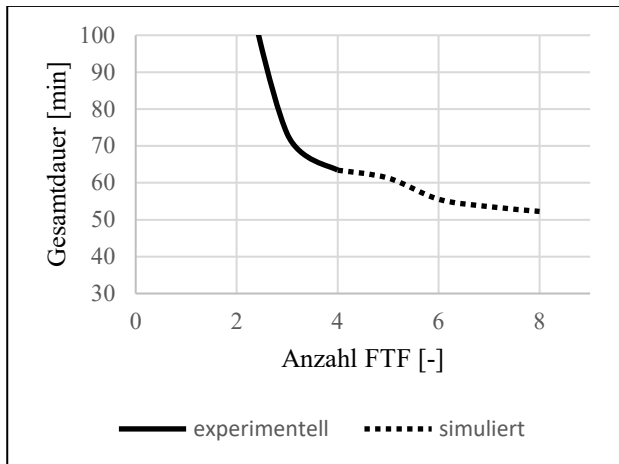


Abbildung 9. Skalierbarkeit FTS im CPPS

Der nächste Versuch ermittelt die Auswirkung des Kalenders im CPPS. Hierzu werden jeweils zehn Produktionsaufträge generiert, für die die vier FTF den Materialfluss realisieren. Im ersten Durchgang werden die Transporte ohne Kalender durchgeführt. Das bedeutet, ein FTF kann nur noch den Status frei oder belegt annehmen. Für den zweiten Durchgang wird der Kalender aktiviert und die FTF können planen. Als Benchmark dient die Gesamtdauer aller erforderlichen Transporte zur Fertigstellung der zehn Aufträge. Die Resultate zeigt das Balkendiagramm in Abbildung 10. Mit aktiviertem Kalender konnten 7,8 Minuten eingespart werden, was einer Effizienzsteigerung von 8,5 % entspricht.

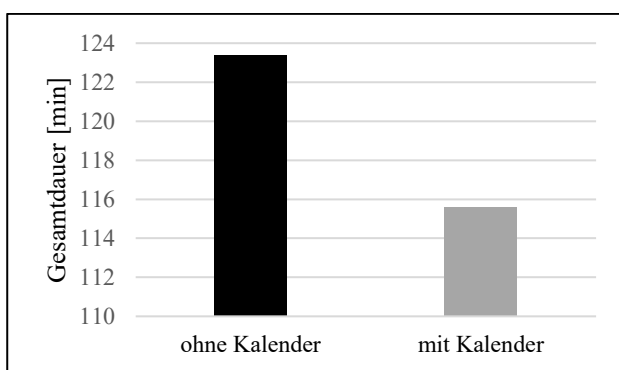


Abbildung 10. Einfluss vertikaler Jobvergabe bei zehn Eingangsbestellungen und vier eingesetzten FTF

## 6 FAZIT UND AUSBLICK

Das komplexe Zusammenspiel der unterschiedlichen Klassen in der CPPS-Umgebung erschwert eine analytische Herangehensweise zur Identifikation der Einflussfaktoren. Daher erfolgt eine isolierte Betrachtung des FTS. Der in diesem Beitrag angewandte Ansatz des *Contract Net*

*Protocol* erweist sich als geeignetes Protokoll für die dezentralen Kommunikationsweisen des CPPS und erfüllt die Anforderung der Skalierbarkeit. Hierdurch lassen sich kurzerhand Entitäten in das Produktionsfeld hinzufügen, um so beispielsweise flexibel auf Bedarfsspitzen reagieren zu können. Des Weiteren erfüllte der im CPPS eingebettete *Kalender* die Anforderung der vertikalen Auftragsverteilung. Das intelligente Planen von Transportaufträgen resultiert in kürzeren Durchlaufzeiten und schont somit eingesetzte Ressourcen. Für Unternehmen bedeutet das eine gesteigerte Wettbewerbsfähigkeit, da sie flexibler auf den Markt reagieren und einfacher kundenindividuelle Produkte herstellen können.

In zukünftiger Forschungsarbeit ist geplant, Heuristiken und Prädiktionsmodelle in das CPPS zu implementieren. Die durch Versuche gesammelten Daten können genutzt werden, um maschinelle Lernalgorithmen zu trainieren, die weitere Effizienzsteigerung durch eine intelligentere Verwaltung der Auftragspläne ermöglichen. Des Weiteren kann der Einsatz der Blockchain-Technologie im CPPS experimentell betrachtet werden, wo jede Entität Zugriff auf die komplette Historie der verhandelten Aufträge besitzt.

### FÖRDERHINWEIS

Diese Veröffentlichung wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Innovationslabor Hybride Dienstleistungen in der Logistik“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

### LITERATUR

- [Bau14] Bauernhansl, Thomas: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten; Vogelheuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN 978-3-658-04682-8
- [Bul93] Bullinger, H.-J. (Hrsg.): *Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis*. München: Hanser, 1993. ISBN: 3-44614-606-7.
- [FIPA02] Foundation for Intelligent Physical Agents, “FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification”, 2002. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.fipa.org/specs/fipa00029/S-C00029H.pdf>
- [Fra19] Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, „Innovationslabor hybride Dienstleistungen in der Logistik“, 2019.



[Online]. Verfügbar unter:  
<http://www.innovationslabor-logistik.de/>

Formen der Zusammenarbeit von Menschen und Maschinen in der Logistik“, in *Logist. J. Proc.*, Bd. 2017, Nr. 10, Okt. 2017. – DOI 10.2195/lj\_Proc\_zeidler\_de\_201710\_01

- [KH10] Y. Koren; R. Hill, “The global manufacturing revolution: Product-process-business integration and reconfigurable systems”. Hoboken, NJ: Wiley a John Wiley & Sons Inc, 2010 (Wiley series in systems engineering and management). ISBN 978-0-470-58377-7
- [MQTT18] OASIS Committee Specification 02, „MQTT Version 5.0“. editiert von Andrew Banks, Ed Briggs, Ken Borgendale, und Rahul Gupta, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>
- [Rob19] Robotnik Automation S.L.L., „Datasheet RB1-Base“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.robotnik.es/web/wp-content/uploads/2018/02/RobotnikLog\\_DS\\_RB-1-BASE\\_EN.pdf](https://www.robotnik.es/web/wp-content/uploads/2018/02/RobotnikLog_DS_RB-1-BASE_EN.pdf)
- [RR07] S. Ruby, L. Richardson, *Web Services mit REST*. Hoboken, O'Reilly Verlag GmbH & Co. KG, 2007. ISBN 978-3-89721-727-0.
- [SCS19] *Self-Contained Systems*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://scs-architecture.org/>
- [SBS<sup>+</sup>19] Skubowius E, Bayhan H, Schwede C, ten Hompel M (2019); „Simulation als Voraussetzung zur dezentral gesteuerten Materialbereitstellung in cyber-physischen Produktionssystemen“; in *VDI-Fachkonferenz Intralogistik, 28. Deutscher Materialfluss-Kongress*. VDI-Bericht 2340, 03/2019, S. 77-89. ISSN 0083-5560 / ISBN 978-3-18-092340-6
- [VRR<sup>+</sup>15] A. K. R. Venkatapathy, A. Riesner, M. Roidl, J. Emmerich, und M. t Hompel, „PhyNode: An intelligent, cyber-physical system with energy neutral operation for PhyNetLab“, in *Smart SysTech 2015; European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies*, 2015, S. 1–8. – DOI 10.15439/2017F253
- [ZBV<sup>+</sup>17] F. Zeidler, H. Bayhan, A. K. Ramachandran Venkatapathy, und M. ten Hompel, „Referenzfeld zur Erforschung und Entwicklung neuartiger hybrider

---

**Dominik Borst, M.Sc.**, Research Assistant at the Chair of Materials Handling and Warehousing (FLW), TU Dortmund University. He studied Mechanical Engineering.

Phone: +49 231 755-2794, Fax: +49 231 755-4768,  
E-Mail: [dominik.borst@tu-dortmund.de](mailto:dominik.borst@tu-dortmund.de)

**Haci Bayhan, M.Sc.**, Research Assistant at the Chair of Materials Handling and Warehousing (FLW), TU Dortmund University. He studied Mechanical Engineering.

Phone: +49 231 755-3442, Fax: +49 231 755-4768,  
E-Mail: [haci.bayhan@tu-dortmund.de](mailto:haci.bayhan@tu-dortmund.de)

**Michael Ratke**, Student Assistant at the Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics IML. He studies Computer Science at TU Dortmund University.

E-Mail: [michael.ratke@tu-dortmund.de](mailto:michael.ratke@tu-dortmund.de)

**Prof. Dr. Dr. h. c. Michael ten Hompel**, head of the Chair of Materials Handling and Warehousing, TU Dortmund University and Managing director of the Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics IML.

Phone: +49 231 9743-600, Fax: +49 231 755-4768,  
E-Mail: [michael.tenHompel@tu-dortmund.de](mailto:michael.tenHompel@tu-dortmund.de)

Address:  
Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen (FLW), TU Dortmund,  
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund, Germany